



Traitement de situations inattendues d'extrême urgence en vol : test d'un modèle cognitif auprès de pilotes experts

Jean Pinet

► To cite this version:

Jean Pinet. Traitement de situations inattendues d'extrême urgence en vol : test d'un modèle cognitif auprès de pilotes experts. Psychologie. Université Toulouse le Mirail - Toulouse II, 2011. Français. NNT : 2011TOU20022 . tel-00626932

HAL Id: tel-00626932

<https://theses.hal.science/tel-00626932>

Submitted on 27 Sep 2011

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Université
de Toulouse

THÈSE

**En vue de l'obtention du
DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE**

Délivré par :

Université Toulouse 2 Le Mirail (UT2 Le Mirail)

Discipline ou spécialité :

Psychologie Ergonomie

Présentée et soutenue par :

Jean PINET

le : jeudi 30 juin 2011

Titre :

Traitement de situations inattendues d'extrême urgence en vol :
test d'un modèle cognitif auprès de pilotes experts

Ecole doctorale :

Aéronautique et Astronautique (AA)

Unité de recherche :

CLLE-LTC (UMR 5263), Université de Toulouse II - Le Mirail

Directeur(s) de Thèse :

Guy BOY, University Professor, Florida Institute of Technology
Claude NAVARRO, Professeur, Université de Toulouse II - Le Mirail

Rapporteurs :

René AMALBERTI, Professeur, Haute Autorité de la Santé, Saint Denis La Plaine
Patrick MILLOT, Professeur, LAMIH, Université de Valenciennes

Autre(s) membre(s) du jury

Eric RAUFASTE, Professeur, Directeur de CLLE-LTC, Université de Toulouse II - Le Mirail
Marc PELEGRIN, Docteur, Conseiller Honoraire de l'ONERA, Toulouse

Traitement de situations inattendues d'extrême
urgence en vol: test d'un modèle cognitif
auprès de pilotes experts

Remerciements

Il a fallu une bonne dose de confiance à Guy Boy et Claude Navarro pour soutenir ma candidature à cette thèse, et à l'Ecole doctorale Aéronautique- Astronautique pour accepter l'ancêtre que je suis (Supaéro 1952). Je les en remercie. Mais ensuite je dois louer la patience exemplaire de mes directeurs de thèse Claude et Guy pour me guider, souvent fermement, sur les chemins difficiles de la recherche et pour m'en faire respecter la signalisation stricte. J'espère être resté sur la chaussée sans avoir heurté qui que ce soit, même involontairement.

J'ai rencontré sur ces chemins beaucoup d'aide amicale, parfois surprise, mais toujours critique et sans concession sur les sujets traités. Je l'ai reçue de grands professionnels sachant parfaitement de quoi ils parlent, que je cite en priant par avance ceux que ma mémoire défaillante aurait oubliés de bien vouloir m'en excuser :

Pierre Baud, Claude Bechet, André Bes, Jean-Claude Bück, Frédéric Combes, Bertrand De Courville, Frédéric Dehais, Alain Guillard, Claude Lelaie, Claire Pélegrin, Jean-Michel Roy, Etienne Tarnowsky, Nicole et Jean-Claude Wanner, en incluant ès qualités évidemment Guy Boy et Claude Navarro. Avec une mention spéciale pour Jean-Claude Wanner m'ayant aidé non seulement par nos discussions animées mais aussi par son talent de dessinateur informaticien. Je les remercie tous pour leur spontanéité à répondre à mes demandes et pour la pertinence de leurs informations, remarques et critiques.

Un volet particulier concerne ma famille. Mes enfants n'ont apparemment pas été surpris de ma décision de renouer avec des pratiques scolaires abandonnées depuis longtemps. Quant à mon épouse Claudine, habituée elle aussi à mes décisions pas très conformistes, elle a veillé de façon très vigilante sur la tranquillité de mes travaux. Je les remercie de tout cœur pour leur confiance.

RESUME

Dans l'exercice de leur profession les pilotes doivent fréquemment faire face à des situations soudaines et inattendues, souvent potentiellement dangereuses. Ils sont formés pour les traiter efficacement mais cependant la brièveté du temps disponible avant que la situation ne dégénère, de l'ordre de quelques secondes, au plus la minute, fait que parfois la séquence cognitive perception-diagnostic-décision-action, peut être menée de façon incorrecte sous stress et aboutir à un incident grave ou même à un accident.

A partir de l'analyse des comportements cognitifs élémentaires en situation critique dans cinq cas d'incidents et d'accidents, on arrive à déceler des dénominateurs communs aux réactions des pilotes, permettant l'explication des échecs constatés et l'établissement de recommandations. Le rôle primordial sous stress d'une fonction cognitive particulière associée à la mémoire à court terme est mis en lumière.

Pour effectuer cette analyse il a été nécessaire de définir une modélisation dynamique du comportement cognitif des pilotes, où le facteur temps est explicité, permettant son étude dans des séquences très brèves de quelques secondes. Cette modélisation peut aussi s'appliquer à d'autres cas que ceux générant des accidents, par exemple à l'étude et à la définition des systèmes nécessitant une interface homme-système.

La complexité et la particularité des actions opérationnelles dans des séquences très rapides où elles se combinent, a mené naturellement à effectuer les analyses en utilisant l'expertise de pilotes, suivant une méthode autorisant la validation des hypothèses retenues.

ABSTRACT

During the exercise of their profession, frequently pilots have to face sudden, unexpected, and often potentially dangerous, situations. They are trained to deal with these effectively, but the very short length of time available before the situation degenerates – in the order of a few seconds, a minute at most – means that the cognitive sequence of perception-diagnosis-decision-action can sometimes be carried out incorrectly due to stress and lead to a serious incident or even to an accident.

An analysis of basic cognitive behaviour patterns during a critical situation in five cases of incidents and accidents, reveals common denominators within pilots' reactions which make it possible to explain the failures observed and establish recommendations. The crucial role under stress played by a specific cognitive function associated with short-term memory is highlighted.

In order to carry out this analysis it was necessary to create a dynamic model of the cognitive behaviour of pilots, bringing out the time factor, so as to make it possible to study very short sequences of a few seconds. This model can also be applied to cases other than those generating accidents, for instance to the studying and defining of systems requiring human-machine interface.

The complexity and specificity of operational actions when combined into very rapid sequences led naturally to carrying out analyses making use of pilots' expertise, according to a method which enabled validation of the hypotheses employed.

PREAMBULE

L'essentiel de la thèse se trouve sur le document principal, celui-ci, comportant 10 Chapitres.

Certains Chapitres ont nécessité de nombreux travaux dont une partie des détails n'ont que peu d'influence sur l'enchaînement des explications et des démonstrations. Cette partie est reportée dans 3 annexes placées dans un document complémentaire, auxquels il est fait référence dans le texte chaque fois que nécessaire. Ces annexes sont des documents pouvant être consultés de façon indépendante du document principal.

- Annexe 1 : « Notions de pilotage des avions »
- Annexe 2 : « Analyse des 5 cas retenus d'accidents et d'incidents aériens »
- Annexe 3 : « Utilisation et exploitation de l'expertise »

Le texte devant être lu par des personnes n'étant pas forcément familières avec les termes professionnels aéronautiques ou psychologiques, un **Glossaire** est placé séparément à la fin des annexes pour être consulté autant que nécessaire.

Les références documentaires se trouvent au Chapitre 10.

La table des matières donne en détail les têtes de chapitres et de sous-chapitres.

Table des matières

1 – INTRODUCTION : PRESENTATION DE LA THESE	1
1.1 – LA MOTIVATION DE BASE	2
1.2 – LA CONSEQUENCE	4
1.3 – LA DEMARCHE SUIVIE	5
2 – INTRODUCTION AUX TECHNIQUES AERONAUTIQUES	8
2.1 – OBJECTIF DE CETTE INTRODUCTION	9
2.2 – OÙ EVOLUE LE PILOTE ?	9
1 ^{er} système	10
2 ^{ème} système	11
3 ^{ème} système	11
4 ^{ème} système	12
5 ^{ème} système	12
6 ^{ème} système	13
2.3 – L'INTERFACAGE OPERATIONNEL ENTRE CES SYSTEMES	13
2.4 – COMMENT LE PILOTE INTEGRE CES SYSTEMES ?	17
2.5 – REMARQUES SUR LES FIGURATIONS	19
3 – METHODE ET MODELE COGNITIFS ADOPTES	20
3.1 – DEMARCHE CHOISIE	21
3.2 – L'INDISPENSABLE MODELISATION	22
3.3 – CONCEPTS UTILISES	23
3.3.1- Concernant la structure cognitive de base	23
La mémoire	23
Les modèles mentaux et les images mentales	25
Les actions conscientes et inconscientes	25
3.3.2 - Concernant les mécanismes cognitifs	26
Le traitement de l'information humaine	26
La charge de travail mentale	26
Le partage du temps, les ressources multiples, les tâches multiples	27
Le système cognitif associé	29
Les agents et fonctions cognitives associées	29
3.3.3 - Concernant la manifestation de ces mécanismes cognitifs	30
Les choix et la probabilité subjective	30
L'influence du contraste	31
Les priorités sous stress	31
La décision identifiée primordiale	33
La gestion de tâches multiples	33
L'intuition	33
Les conflits, la persévération, l'effet tunnel	34
Le mécanisme du diagnostic	35
L'expertise	36
Les erreurs, la défaillance, la gestion des risques	37
La résilience	38
3.3.4 - L'élément primordial dans toute action	39
Le temps	39
3.4 - HYPOTHESES ET CHAMP D'APPLICATION	40
3.4.1 - L'utilisation des concepts choisis.	40

3.4.2 - De quel pilote s'agit-il ? Les paramètres humains.	40
3.4.3 - Le temps.	41
3.4.4 - Limite de validité	41
3.5 – ELABORATION DU MODELE	42
3.5.1 – Présentation et hypothèse de base	42
3.5.2 - Modèles mentaux	42
Que sont-ils ?	42
Quels sont-ils ?	43
Comment ont-ils été construits ?	44
Comment sont-ils utilisés ?	45
3.5.3 – Les mémoires à court terme et de travail	46
3.5.4 - Mécanismes de base	47
Présentation	47
Actions conscientes	48
<i>Quelques caractéristiques des actions conscientes</i>	48
Actions automatiques	49
<i>Quelques caractéristiques des actions mentales automatiques</i>	49
3.5.5 - Processeur opérationnel et agents	50
Fonctionnement de base	50
<i>Quelques caractéristiques du fonctionnement des agents</i>	51
<i>Fonctionnement du processeur opérationnel</i>	51
Fonctions non spécialisées ou permanentes des agents	52
Fonctions spécialisées des agents	53
3.5.6 - Fonctions cognitives	54
3.5.7 – Objectifs	54
3.5.8 – Perceptions	55
3.5.9 – Fonctionnement temporel	57
 4 – MODELE UTILISE	 58
4.1 – SCHEMA FONCTIONNEL CINEMATIQUE DE BASE	59
4.2 – FONCTIONNEMENT DYNAMIQUE	60
4.3 – NIVEAUX D'INTERVENTION DES FONCTIONS COGNITIVES	60
4.3.1 - Niveau basique inférieur automatique (NBIA)	61
a - Les fonctions cognitives automatiques déléguées	61
b - Les fonctions cognitives automatiques autonomes	61
4.3.2 - Niveau basique inférieur conscient (NBIC)	62
<i>Remarques sur le fonctionnement cognitif de ce niveau</i>	62
4.3.3 - Niveaux supérieurs conscients gestionnaires des niveaux basiques	62
1 ^{er} Niveau de gestion opérationnelle (NGO 1)	63
2 ^{ème} Niveau de gestion opérationnelle (NGO 2)	63
3 ^{ème} Niveau, de détection d'anomalies (NDA)	64
4 ^{ème} Niveau, supérieur conscient (NSC)	64
4.4 – L'UTILISATION EFFICACE DES ACTIONS COGNITIVES DISCONTINUES	65
4.5 - QUEL TEMPS UTILISER ? LE SEQUENCMENT	65
4.6 - PROCESSUS DE L'ANALYSE COGNITIVE EFFECTUEE	66
4.7 – DESCRIPTION DE LA METHODE D'ANALYSE UTILISEE	67
4.7.1 – Séquencement	67
4.7.2 – Analyse par séquence	67
4.7.3 – Exploitation	68
5 - ANALYSE DE CAS	69
5.1– PRELIMINAIRES	70

5.1.1 - Cas étudiés	70
5.1.2 - Utilisation du modèle choisi pour l'analyse	70
5.1.3 – Bases de l'analyse	70
5.1.4 - Présentation	72
5.1.5 – Utilisation des experts – Cotation de validité	73
5.2 – ETUDE DES CAS	74
5.2.1 - Introduction	74
5.2.2 – Etude des cas choisis	75
5.3 – A330 – INCIDENT, APPROCHE, REMISE DE GAZ	76
5.3.1 – Résumé du cas	76
5.3.2 – Analyse	79
1 – Choix de séquences	79
2 – Analyse chronologique des séquences	79
<i>Séquence 0 : fin de l'approche</i>	79
<i>Séquence 1 : Remise de gaz</i>	80
<i>Séquence 2 : montée</i>	82
<i>Séquence 3 : début d'interception d'altitude</i>	82
<i>Séquence 4 : poursuite de la diminution d'assiette</i>	89
<i>Séquence 5 : confusion</i>	92
<i>Séquence 6 : essai de récupération</i>	93
<i>Séquence 7 : début de réduction de vitesse</i>	93
<i>Séquence 8 : ressource</i>	94
<i>Séquence 9 : fin de récupération</i>	95
<i>Suite du vol</i>	95
5.4 - RESUME DES ANALYSES DU DEROULEMENT DES EVENEMENTS OBSERVES DANS LES CAS TRAITES	97
Cas 1 : A330 en remise de gaz	97
Cas 2 : A321 arrêt décollage	98
Cas 3 : Concorde, approche/atterrissage	99
Cas 4 : F/A-18, meeting aérien	99
Cas 5 : A310, atterrissage	100
6 – UTILISATION DE L'EXPERTISE	102
6.1 – PRESENTATION	103
6.2 - BILAN DU CHOIX DES SEQUENCES	103
6.3 – EXPLOITATION DES COTATIONS	104
6.4 - RESUME DES OPINIONS EXPRIMEES PAR LES EXPERTS	106
6.4.1 - Experts opérationnels	106
6.4.2 – Autres avis	108
7 – ANALYSE ET INTERPRETATIONS ; RECOMMANDATIONS ASSOCIEES	109
7.1 - PRESENTATION	110
7.2 – POINTS PARTICULIERS	110
7.2.1 – Influence de facteurs autres qu'opérationnels	110
7.2.2 – Dédutions principales des analyses	111
7.2.3 – Analyse de la focalisation et de l'effet tunnel ; Caractéristiques observées	112
7.3 – DEDUCTIONS ET REMARQUES SUR LE FONCTIONNEMENT COGNITIF	114
7.3.1 - Hypothèse 1 : Fonction cognitive type de base	114
7.3.2 - Hypothèse 2 : Influence du contraste entre situation présente et évènement	117
7.3.3 - Hypothèse 3 : Obligation de réactions simples	117
7.3.4 - Hypothèse 4 : Constance de la limitation de la Capacité cognitive consciente	118

Concept de Capacité cognitive consciente	118
Dimension puissance cognitive	118
Dimension énergie cognitive	120
Remarques	120
7.3.5 – Probabilités ou certitudes	120
7.4 – RESULTATS ET COMMUNS DENOMINATEURS - RECOMMANDATIONS	121
7.4.1 - Résumé	121
7.4.2 – Premier point : Evènement déclencheur	121
7.4.3 – Deuxième point : Diagnostic	122
7.4.4 – Troisième point : Décision-Action	125
7.4.5 – Quatrième point : Interruption de l'effet tunnel	129
 8 - REFLEXIONS AMENEES PAR LA THESE ET ACTIONS SOUHAITABLES	 131
8.1 – PRELIMINAIRES	132
8.2 – UTILISATION DE LA METHODE	132
8.3 – POURSUITE DE LA RECHERCHE ET DU DEVELOPPEMENT DE LA METHODE	133
8.4 – CONSEQUENCES DE L'EXISTENCE DE LA FONCTION COGNITIVE DE BASE	134
8.4.1 – Nécessaire prise en compte	134
8.4.2 – L'avion meilleur que le pilote	135
8.4.3 – Prise en compte de la fonction cognitive type de base	136
8.4.4 – Synthèse des actions souhaitables	136
Interfaces	136
Tâches et procédures	140
Education / Formation	141
Sélection	144
 9 – EXEMPLE D'APPLICATION DE LA METHODE	 145
9.1 – Objectif	146
9.2 – Cas traité : Arrondi d'atterrissage d'un avion de type A340-600 en pilotage manuel	146
9.2.1 – Introduction	146
9.2.2 – Méthode d'analyse	147
Modèle cognitif	147
Séquences	147
Plan de l'analyse	147
Schéma fonctionnel en pilotage manuel	148
9.2.3 – Analyse	149
1 – Données de base (hypothèses de travail)	149
2 – Equilibre des forces et moments	149
3 – Description sommaire de l'arrondi	150
4 – Problème constaté	151
5 – Approche finale (200 ft à 100 ft de hauteur hz)	151
6 – de 100 ft à 50 ft	153
7 – de 50 ft à 20 ft	155
8 – de 20 ft au sol	158
9.2.4 – Commentaires	161
 10 – REFERENCES – BIBLIOGRAPHIE	 163

Table des figures

Figure 1 : Exemple de PFD de l'A330

Figure 2 : Exemple de ND de l'A330

Figure 3 : Exemple de figuration d'une approche ILS

Figure 4 : Ecran ECAM A330 montrant les paramètres de conduite des moteurs

Figure 5 : Affichages et tendances

Figure 6 : Mémoire court terme

Figure 7 : Schéma fonctionnel de base

Figure 8 : Evolution de l'assiette apparente

Figure 9 : Séquencement du cas n°1

Figure 10 : Périodes d'assiette apparente positive

Figure 11 : Exemple de figuration sur PFD

Figure 12 : Tableau des cotations d'experts

Figure 13 : Exemple de figurations PFD et ND en approche

Figure 14 : Exemple de figuration exocentrique 3D de trajectoire

Figure 15 : Schéma fonctionnel de pilotage manuel à l'atterrissage

Provenance des figures :

1, 2, 4, 14: Aéroconseil

8 : Air France

1 – INTRODUCTION :
PRESENTATION DE LA THESE

1.1 – LA MOTIVATION DE BASE

Le titre de cette thèse reflète les aspects principaux du travail effectué : élaboration d'un modèle cognitif, choix de situations, test de ce modèle auprès d'experts. Cependant, pour nous pilotes, une formulation plus professionnelle peut ainsi s'exprimer : « Analyse de notre comportement opérationnel dans des situations soudaines, inattendues, rapides et potentiellement dangereuses » en application de la célèbre maxime de Socrate « *Connais-toi toi-même* ».

Lorsqu'on a profondément vécu la passionnante profession de pilote, lorsqu'on a directement observé son propre comportement et celui de ses camarades dans des situations critiques, lorsqu'on a tout aussi directement observé le comportement de centaines et de milliers de pilotes en formation sur des avions au sommet de la technique, on n'est pas indifférent à l'apparent décalage entre la haute technicité rationnelle des matériels placés entre ses mains et la multitude de « recettes » de tous genres à appliquer pour être capable de les utiliser en les maîtrisant. D'où l'impression un peu désagréable de devoir utiliser des sciences « douces » ou « molles » pour gérer un milieu de sciences « exactes » dans lequel on baigne depuis son éducation de base.

Dans cette gestion, d'un côté il y a la frustration de ne pas pouvoir éduquer les autres et soi-même de façon sûre et durable afin d'être en mesure de faire face à tout imprévu. Car ce redoutable imprévu, ou plutôt inattendu, fait partie de la vie courante du pilote, bien qu'il essaie de le deviner et de le prévoir à l'avance afin d'y répondre le mieux possible. Cette manière de traiter les événements futurs est une caractéristique du métier de pilote : « pense en avance, *think ahead* ! ».

D'un autre côté il y a le sentiment, diffus mais basé sur l'observation, qu'au-delà des grandes différences personnelles, caractère, éducation, culture, expérience, dans ces moments de fort stress il existe parmi les pilotes un commun dénominateur dont la découverte, la connaissance, la prise en compte, permettraient d'améliorer la maîtrise des machines volantes, conçues par des humains pour des humains malgré tous leurs défauts. L'exploration systématique du très complexe milieu qu'est le cerveau laisse présager l'existence de ce dénominateur commun (Imbert, 2006).

Quotidiennement dans le monde surviennent des centaines de situations imprévues, soudaines, rapides et potentiellement dangereuses, que le public ignore car elles sont maîtrisées par les pilotes. Ils sont formés pour cela. Seuls parfois des comptes-rendus souvent confidentiels en font état. Alors pourquoi s'en inquiéter avec le très bas taux d'accidents dans le transport aérien¹, d'autant plus qu'approchant d'une asymptote de

¹ Un accident avec victimes par 1.500.000 de décollages (statistiques NLR 2010)

possibilités techniques d'amélioration, les efforts pour diminuer ce taux coûtent de plus en plus cher, en recherche et en coût financier ? La réponse est la résonance dans le public de la fréquence d'accidents devant augmenter avec la croissance du trafic aérien, du nombre de victimes potentielles lié à la taille croissante des avions, et le refus de tout risque par notre société.

Mais pour découvrir ce commun dénominateur fallait-il se pencher sur l'analyse des conditions ayant amené la résolution sans difficulté de cas dangereux, comme le pensent certains avec raison (Hollnagel, Woods, & Levenson 2006), ou à l'instar de la médecine analyser ceux, « pathologiques », ayant conduit à des accidents ? En fait, comme dans la médecine, il est plus aisé de traiter ces derniers parce qu'ils sont en général mieux observés et analysés, donc connus, et qu'ils conduisent à définir des « remèdes acceptables » bien que contraignants car s'appliquant à des situations irréfutablement dangereuses. Alors que définir des remèdes d'après des cas résolus semble inutile puisqu'ils ont été résolus. Cette thèse est ainsi basée sur l'examen clinique d'incidents et d'accidents, avec trois cas s'étant bien terminés et deux ayant conduit à la destruction de l'avion.

Une autre motivation dans le choix de s'intéresser à l'exploration interne des comportements découle d'un triple constat.

Le premier est qu'on utilise toute avancée technologique pour améliorer l'intervention des pilotes, surtout en le remplaçant par des automatismes partout où c'est possible, avec succès car cela a amené une réduction drastique du taux d'accidents. Mais le résultat est qu'on arrive à penser que la technologie est la panacée pour résoudre les problèmes humains dans la conduite de l'avion, alors qu'en utilisation opérationnelle la part humaine des causes d'accidents reste constante autour de 75%, cela sans compter la part humaine dans la définition, la fabrication, la maintenance des matériels et celle dans l'organisation du transport aérien. La part totale avoisine alors les 100%.

Le deuxième constat, conséquence de l'utilisation en augmentation permanente des automatismes (avec l'idée de supprimer à terme totalement l'intervention des pilotes, ce qui sera techniquement possible un jour), est la tendance constatée en aéronautique à penser que le restant d'humain dans le cockpit ne nécessitera aucune compétence particulière. Ce qui est aussi faux que penser éradiquer toute erreur dans le comportement humain. En particulier lorsque survient cet imprévu soudain et dangereux qu'on n'arrivera jamais à totalement prévoir, même si l'on peut jour après jour en diminuer l'occurrence, mais là aussi de façon asymptotique.

Le troisième constat découle des précédents. Pour améliorer la performance humaine, que ce soit en matière de gestion économique du vol ou en matière de sécurité de ce vol, on insère le pilote dans une organisation de plus en plus serrée, voire contraignante (règles, procédures, automatismes), en essayant de prendre en compte ses limites grâce à une multitude de « recettes », mais sans trop se soucier de comprendre les causes des dépassements de ces limites considérés comme des erreurs ou des fautes. Pourquoi ces limites existent-elles ?

Au crépuscule d'une vie professionnelle bien remplie d'une expérience diversifiée, la découverte de ce dénominateur commun est le défi que nous nous sommes fixé. Le choix d'une thèse s'est imposé par le constat que cette découverte passait obligatoirement par le rapprochement de deux domaines n'ayant que très peu de points communs, le très

technique dans lequel je me suis toujours déplacé, et le psychologique que je côtoie depuis plus de 30 ans, mais auquel je n'appartiens pas officiellement. Pour être crédible dans les deux communautés il me fallait donc appartenir aux deux, associant l'opérationnel technique aux fonctions mentales le gérant.

Enfin ayant constamment essayé, avec un certain succès, de rationaliser l'exécution des essais en vol et la formation des pilotes, aussi bien pour des essais de missiles que pour la conduite des avions tels que Concorde et les Airbus, l'idée de base de la recherche était de déboucher sur un début de rationalisation des comportements permettant à des ingénieurs de bureaux d'études de concevoir des systèmes directement adaptés aux humains devant les utiliser.

Ainsi le véritable objet de la thèse n'est pas une réflexion intellectuelle sur mon comportement opérationnel ni sur celui de mes amis pilotes. C'est la possibilité de donner aux responsables de la conception des équipements et des procédures destinés à assurer l'interfaçage entre l'avion et les pilotes, une idée précise et synthétique des comportements opérationnels à attendre lors de l'utilisation de ces systèmes, avec la faculté de choisir les meilleures solutions. En fait la démarche suivie est la prolongation d'une discussion avec Guy Boy sur « l'Être technologique », sur la rationalisation du comportement (Boy & Pinet, 2008).

C'est aussi une tentative d'approcher « *la limite de la formation et de la compréhension en situation dynamique* » de la conduite d'un système à risque, le transport aérien (Amalberti, 2001).

1.2 – LA CONSEQUENCE

S'occuper du comportement opérationnel des pilotes dans la totalité des situations se présentant à eux se plaçait évidemment hors du cadre limité d'une telle thèse.

Nous avons choisi un type de situations permettant à la fois de restreindre le champ de la recherche et de présenter un important intérêt dans la résolution des accidents les plus fréquents, ceux survenant en quittant le sol ou en y revenant (66% entre 2000 et 2009 d'après l'IATA Safety Report 2009).

C'est dans de telles situations que les imprévus, soudains, inattendus et nonplanifiés, sont les plus dangereux car nécessitant des réactions rapides, quasi immédiates. Le temps est alors compté (de quelques secondes à la minute) et doit être utilisé au mieux. Il devient le paramètre clé. Dans ces cas toute considération en dehors de la situation présente est effacée et la concentration cognitive est maximum. D'où le sentiment que les connaissances tirées de ces circonstances pouvaient être basiques.

Mais l'analyse des accidents et incidents montre de façon claire que le comportement opérationnel se plie à des contraintes très techniques connues, tout en suivant d'autres contraintes, elles humaines, psychologiques et physiologiques souvent peu connues ou devinées. Toute analyse cognitive opérationnelle suit inexorablement ce double chemin, et comporte inévitablement et de façon simultanée et intriquée des aspects techniques et humains. Cette complexité particulière impose le recours à l'expertise pour l'appréhender.

Un piège redoutable est celui du vocabulaire. Nous avons pu assister à des échanges au cours desquels des participants n'arrivaient pas à s'entendre alors qu'ils évoquaient des concepts identiques avec des mots différents, le plus fréquemment parce qu'ils introduisaient dans les mots des nuances ou des significations spécifiques adaptées à leur discipline que les autres ne saisissaient pas. Cette thèse n'échappera probablement pas à ce problème sémantique.

1.3 – LA DEMARCHE SUIVIE

1 - La recherche est basée sur l'analyse cognitive de cas réels d'incidents et d'accidents aéronautiques. Un premier choix avait permis de sélectionner 17 cas intéressants. Cependant très tôt est apparue une limitation temporelle : malgré le grand intérêt de l'ensemble de la sélection, pour rester dans les limites des 3 ans de la thèse et compte tenu du niveau de détail nécessaire à l'analyse, le travail sur seulement 5 cas était envisageable.

Les critères suivants ont été utilisés dans leur choix :

- possibilité d'avoir les informations détaillées et sûres nécessaires ;
- situations de caractère soudain, inattendu, dangereux ;
- phases de vol près du sol, au décollage ou à l'atterrissage, classées parmi les plus fréquemment accidentogènes ;
- matériels techniquement modernes ;
- cas les plus diversifiés possibles pour éviter la focalisation sur un seul type de situations ;
- mélange d'événements ayant été maîtrisés ou ne l'ayant pas été.

A l'usage l'ensemble de ces 5 cas a permis de rassembler les principaux éléments du thème de la thèse.

Le Chapitre 5 et l'Annexe 2 présentent ces 5 cas et leurs analyses détaillées.

2 – Le thème de cette thèse, impliquant l'examen de ces incidents et accidents sous le double aspect, psychologique d'un côté, et technique et opérationnel de l'autre, concerne donc deux spécialités très différentes, les psychologues et les pilotes, n'ayant que peu de contacts et de vocabulaires communs et nous avons essayé de présenter le cadre opérationnel des analyses à l'aide de textes et d'exemples permettant aux spécialistes de chaque bord de comprendre ce qu'il était nécessaire de traiter. Ainsi le Chapitre 2 et l'Annexe 1 donnent des informations sur l'environnement aéronautique, s'adressant surtout aux psychologues, et le Chapitre 3 traite les questions de psychologie, s'adressant à la fois aux ingénieurs, aux pilotes et aux psychologues.

Le Glossaire permet au lecteur d'y retrouver les termes utilisés dans l'ensemble de la thèse.

3 – D'emblée s'est posé le problème du choix des modèles utilisables pour l'analyse cognitive des 5 cas choisis. Nous n'en avons trouvé aucun permettant une analyse détaillée des comportements dans des durées de l'ordre de grandeur de quelques secondes, et s'appliquant à une évolution dynamique où la constante de temps était la seconde (voir Chapitre 3).

La combinaison de trois concepts, les modèles de J.Rasmussen, les agents et fonctions cognitives de G.Boy, les modèles mentaux de J.C.Wanner et P.Lecomte, a permis de concevoir un modèle « cinématique » de base convenable, où la « dynamique », c'est-à-dire

l'évolution et la sélection des interactions en fonction du temps, est introduite par des fonctions cognitives s'alimentant de modèles mentaux.

Cette dynamique est rendue possible, dans les faibles durées d'actions cognitives analysées dans la thèse, grâce à la participation essentielle de la mémoire à court terme.

Cet assemblage a ainsi permis d'utiliser en dynamique les modèles cinématiques de Rasmussen, de donner une vie concrète aux fonctions cognitives de Boy, et de placer les modèles mentaux de Wanner et Lecomte dans un environnement dynamique. Ce résultat n'est pas le moindre.

Les Chapitres 4 et 5 traduisent cette mise en place d'un modèle.

4 – Le modèle ne suffisait pas car un problème majeur se posait en évolution dynamique : il fallait relier ensemble, synchroniser, deux types de temps. Celui physique d'écoulement constant, s'appliquant aux faits observables, à la mécanique du vol et au fonctionnement des systèmes matériels, et celui psychologique et physiologique, variable et régissant les comportements humains internes.

La solution adoptée a été le fractionnement des événements en « segments temporels », en séquences brèves de quelques secondes balisées par des observations factuelles irréfutables et à l'intérieur desquelles il était possible d'isoler un comportement cognitif élémentaire, c'est-à-dire concernant une tâche élémentaire comme une stabilisation de vitesse. Cette procédure de séquençage a permis les analyses fines recherchées.

Les Chapitres 5 et 6 exposent la méthode utilisée.

5 – Grâce à ces outils, modèle et séquençage, les 5 cas ont été finement analysés d'un double point de vue « opérationnel technique » et « cognitif » dans le Chapitre 5 et l'Annexe 2. Cette analyse a été conduite par un seul expert, l'auteur de la thèse. Mais la fiabilité et la crédibilité des hypothèses utilisées et des résultats se posaient en l'absence de confirmation en laboratoire ou en simulation.

Il a été alors proposé la soumission de l'analyse à des « super-experts », 6 au minimum, pour avaliser la conformité technique et opérationnelle, et la validité des hypothèses des comportements observés.

Huit opérationnels choisis parmi les pairs de l'auteur ont apporté leurs jugements et critiques, dont l'ensemble constitue un complément, la solidification d'un consensus positif.

Deux personnalités, un neurologue et une psychologue intéressés par le sujet de la thèse, ont eu l'amabilité de donner une opinion générale sur la démarche adoptée.

Le Chapitre 6 et l'Annexe 3 donnent les résultats de cette expertise.

6 - Le domaine exploré est celui des situations survenant de façon soudaine et inattendue, engendrant du stress et se développant rapidement dans des durées totales variant de 10 secondes à 1 ou 2 minutes. Nous rappelons ici que le modèle cognitif, la méthode d'analyse, l'analyse elle-même, définis et appliqués ici ne sont a priori valables que dans ce cadre restreint. Les limites des résultats sont évidemment celles du domaine ainsi exploré.

7 – Une objection majeure des experts était que peut-être les analyses ne tenaient pas suffisamment compte des paramètres affectifs des pilotes tels que fatigue ou problèmes physiologiques particuliers. Un constat inattendu mais important a été que les analyses conduites ne nécessitaient pas leur connaissance a priori mais qu'en revanche elles permettaient de les déceler. Cela vient de la logique de la méthode utilisée pour comprendre

les comportements opérationnels cognitifs élémentaires, en comparant dans une brève durée les « sorties » cognitives observées aux « entrées » cognitives probables pour en déduire les actions cognitives possibles, de nombre forcément limité ainsi que constaté. Ce point est traité au Chapitre 7.

8 – La synthèse des résultats a mis en lumière des communs dénominateurs impliquant le rôle de la mémoire court terme² et celui d'une fonction cognitive particulière dépendant sous stress des perceptions et de l'établissement de ces dernières. Le rôle majeur de la mémoire court terme est mis aussi en lumière, en particulier dans le phénomène de l'effet tunnel de la focalisation de l'attention évoqué dans le Chapitre 3. En fait cette mémoire court terme, en même temps qu'elle autorise le traitement d'actions cognitives dynamiques en constitue une limitation humaine dont on ne tient pas assez compte. Ce point explicité dans la thèse est important pour une adaptation opérationnelle dans des phases de courte durée.

Les paramètres influents ont été ainsi clairement identifiés, ce qui a autorisé la formulation de recommandations sur la conception des systèmes et de leurs interfaces, et sur l'éducation et la formation des pilotes, voire sur leur sélection.

Les Chapitres 7 et 8 traitent ces points.

9 – La méthode utilisée dans la thèse paraissant pouvoir s'appliquer en dehors des analyses d'incidents et d'accidents, un essai a été conduit avec succès sur le cas d'atterrissage manuel d'un avion gros porteur, montrant ainsi une possibilité d'application plus ouverte sinon plus générale. Cet exemple est présenté au Chapitre 9.

L'extrapolation à d'autres situations stressantes de durées plus longues ou avec des contraintes techniques différentes par exemple en conduite automobile, est possible mais elle nécessiterait une étude particulière.

La suite de ce document va permettre d'explicitier ces points majeurs dans une séquence suivant la démarche exposée.

² Dans cette thèse nous utiliserons le terme simplifié « mémoire court terme » avec le symbole Mct pour désigner la mémoire à court terme

2 – INTRODUCTION AUX TECHNIQUES **AERONAUTIQUES**

2.1 – OBJECTIF DE CETTE INTRODUCTION

Le thème de la thèse impose la recherche ambitieuse de la connaissance de ce qui se passe dans la tête des pilotes. Donc celle des savoir, savoir-faire et savoir-être opérationnels accumulés dans leurs mémoires, c'est-à-dire, suivant la terminologie de Rasmussen, les habiletés, les règles, procédures, et les connaissances qui y sont stockées, pour essayer d'en déduire et expliquer leurs comportements, leurs savoir-être.

Cet ensemble de savoirs est stocké en mémoire, et utilisé à la demande sous des formes qu'on verra plus tard. Mais leur base hautement technique impose un minimum de connaissance opérationnelle à ceux analysant le comportement cognitif des pilotes qui est une adaptation permanente aux combinaisons de tâches techniques nécessaires au vol. Sans une compréhension suffisante de ces tâches la validité des hypothèses sur le comportement serait illusoire.

Cette base de connaissances minimales est donnée dans ce Chapitre 2 et l'Annexe 1.

Il n'est pas question de développer ici la mécanique du vol ou les procédures d'utilisation des avions dans la totalité de leur vaste domaine de vol. Nous nous bornerons à donner l'essentiel s'appliquant aux phases de vol de courtes durées choisies pour les 5 analyses, uniquement en vue d'expliquer le pilotage réel à court terme correspondant aux durées citées. S'adressant surtout aux psychologues ce qui suit donne une présentation éloignée de celle utilisée généralement par la communauté des pilotes que nous rappelons dans l'Annexe 1.

Dans les cas retenus et étudiés dans la thèse nous nous intéresserons essentiellement à la conduite chronologique de la trajectoire d'un avion, en trois dimensions dans l'air et par rapport au sol, et aux fondements correspondants du pilotage, permettant un minimum de compréhension technique de l'analyse.

2.2 – OÙ EVOLUE LE PILOTE ?

De façon classique les pilotes considèrent trois types de gestion du vol : à court terme, à moyen terme de façon tactique, et à long terme de façon stratégique. La présentation des informations, des paramètres du vol, est organisée en fonction de ces trois catégories sur des instruments ainsi spécialisés ainsi qu'on le voit dans l'Annexe 1, Chapitre 1.

Bien que l'objet de la thèse concerne le pilotage à court terme l'examen des actions cognitives dans les cas traités montre que pour expliquer les brèves actions du pilote ce schéma est trop simple car on évolue simultanément dans plusieurs systèmes physiques ayant chacun leur prise en compte cognitive particulière. La pratique du pilotage a enseigné le traitement en cohabitation indifférenciée de ces différents systèmes, qui cependant à très court terme, celui qui nous intéresse, sont traités cognitivement de façon séparée.

Ainsi la conduite du vol concerne 6 systèmes différents, totalement interconnectés mais ayant chacun sa logique propre. Le pilote doit « intégrer » les particularités de ces 6 systèmes et les utiliser comme un tout, d'où la difficulté du pilotage d'un avion qui n'est pas comparable à la conduite « d'un autobus », même si conduire un véhicule terrestre nécessite

déjà des modèles mentaux élaborés. Cette intégration permanente et très dynamique constitue une particularité essentielle de la compétence du pilote.

1^{er} système : L'avion en tant que mobile dans l'air

C'est le comportement aérodynamique de l'avion lui-même, c'est-à-dire son aptitude à évoluer dans l'air (en bougeant autour de son centre de gravité) et en s'y maintenant.

Il est essentiel, et sa gestion (détaillée dans l'Annexe 1) est basée sur le traitement de paramètres physiques conduisant à des ordres sur des commandes de vol modifiant la position de l'avion autour de son centre de gravité ainsi que sa configuration aérodynamique, avec la conséquence immédiate de modifier la trajectoire de l'avion.

Conséquence importante : un avion ne peut voler que s'il se déplace dans l'atmosphère, il ne peut pas s'arrêter en vol quoi qu'il arrive (contrainte physique et psychologique).

Les principaux paramètres de conduite sont :

- La vitesse conventionnelle V_C , dérivée de la vitesse aérodynamique V_{air} qui est la vitesse de l'avion par rapport à l'air. Cette V_C donne au pilote une valeur fictive de vitesse liée directement à l'aérodynamique de l'avion et indépendante des valeurs de pression et de température variables dans l'atmosphère, ce qui est son gros avantage.

- L'altitude pression Z , mesurée par la pression atmosphérique au niveau de l'avion. Cette altitude est proche de la hauteur géographique réelle mais elle en est différente et basée sur des affichages conventionnels de pression de référence au niveau de la mer. Par exemple la hauteur d'un relief peut être différente de l'altitude que donnerait un altimètre avion placé au même endroit.

- La vitesse verticale V_z , dérivée en fonction du temps de l'altitude pression.

- La position des axes de l'avion par rapport à la Terre, donnée par l'horizon artificiel HA , Θ pour l'assiette de tangage longitudinal, Φ pour l'inclinaison latérale de roulis, le cap en azimut par l'indicateur de cap.

- Les limitations d'évolutions aérodynamiques. Ce système a des limitations, car la structure matérielle de l'avion est de résistance limitée, repérées dans le domaine de vol. Pour simplifier, les deux principales limitations structurelles sont : celle liée aux efforts aérodynamiques, associant une vitesse conventionnelle V_C maximum pour chaque configuration d'hypersustentateur (becs de bord d'attaque de l'aile et volets de bord de fuite), et celle liée aux forces massiques (liées aux accélérations), poids plus force centrifuge en virage ou en ressource.

Mais il y a aussi la limitation de maniabilité liée au coefficient aérodynamique de portance C_z maximum correspondant au décrochage aérodynamique de l'air autour de l'aile à forte incidence, qui impose des vitesses conventionnelles minimales, V_C minimum, pour chaque configuration de l'aile (becs de bord d'attaque et volets de bord de fuite).

Ainsi l'évolution de la vitesse V_C est possible entre une limitation basse et une limitation haute pour chaque configuration d'hypersustentateurs.

2^{ème} système : La propulsion de l'avion

C'est l'ensemble propulsif, les moteurs, permettant à l'avion de se déplacer.

Leur poussée équilibre la résistance à l'avancement, compense les variations d'énergie potentielle dues aux variations d'altitude, et celles d'énergie cinétique dues aux accélérations sur la trajectoire. Ceci signifie que lorsque la résistance à l'avancement, la vitesse et l'altitude varient simultanément comme par exemple l'interception d'une altitude en cours de montée, la poussée nécessaire n'est pas aisée à déterminer exactement, d'autant plus qu'elle varie avec la densité de l'air.

On simplifie sa gestion de plusieurs façons, soit par exemple en sélectionnant un régime moteur constant, et les autres paramètres vitesse conventionnelle VC, altitude Z, pente de trajectoire γ en découlent, soit en stabilisant VC, Z ou les 2 à la fois, soit aussi en stabilisant une pente de montée (ou de descente) γ et en ajustant la poussée correspondante manuellement. Désormais le plus souvent on utilise une conduite automatique de la vitesse par le système « Autothrust » ce qui simplifie grandement la manœuvre.

L'énergie est fournie aux moteurs par le carburant, kérosène, stocké dans des réservoirs de capacité fixe, dont le niveau dépend de la mission. Cela signifie que la durée d'un vol est forcément limitée (contrainte physique et psychologique).

Il y a aussi des limitations de poussée maximale liées à des critères de résistance des moteurs en fonction des régimes sélectionnés, par exemple : TOGA (Take-Off & Go-Around, Décollage et Remise de gaz) poussée maximale utilisable quelques minutes ; MCT (maximum continu) poussée élevée inférieure à TOGA mais qui est le maximum utilisable sans contrainte de temps.

3^{ème} système : L'espace mobile environnant

Il est constitué de l'espace atmosphérique dans lequel l'avion se déplace, de sa trajectoire dans l'atmosphère avec toutes les caractéristiques de cette dernière, pression, température, phénomènes météorologiques, précipitations, turbulence, givrage, orages, etc.

La visibilité extérieure est fonction de l'eau et des poussières en suspension dans l'atmosphère.

L'eau sous forme liquide ou solide conditionne l'état de surface des pistes des aéroports.

Cet espace se déplace par rapport à la terre ce qui donne naissance aux vents.

La pente longitudinale de la trajectoire par rapport à l'air γ est donnée par l'horizon artificiel HA. La direction horizontale de la trajectoire par rapport à l'air est donnée par le cap de l'avion.

Des profils opérationnels de vol sont définis pour la montée, la croisière, la descente, l'approche et l'atterrissage, sous forme de paramètres à stabiliser dans chaque phase de vol,

par exemple vitesse conventionnelle VC , altitude Z , pente γ , nombre de Mach M , poussée, etc. Ces profils sont à l'intérieur du domaine de vol comportant ainsi des limitations en altitude, en pente, en turbulence, etc.

4^{ème} système : L'espace fixe géographique

C'est l'environnement géographique, lié à la Terre et à son relief.

Il impose le recalage des trajectoires dans l'air qui se déplace, par rapport au sol qui reste fixe pour que l'avion décolle d'un aéroport, bien localisé géographiquement, pour atterrir sur un autre aéroport lui aussi bien défini au sol, en suivant une route libre d'obstacles liés au relief.

La vitesse réelle de l'avion par rapport au sol V_{sol} est la somme du vecteur-vitesse par rapport à l'air V_{air} , et de celui de la vitesse du vent V_w .

Notez que les altitudes de référence Z citées dans le 1^{er} système sont liées aux pressions barométriques et non aux altitudes géométriques, ce qui donne parfois des différences notables entre les deux.

Cet environnement comporte des éléments essentiels pour le pilote :

- le jour et la nuit
- la concrétisation des trajectoires par rapport au sol par les moyens radioélectriques, inertiels, ou satellites : routes aériennes, balisages, GPS, aides à l'atterrissage, etc
- les systèmes d'évitement d'obstacles au sol (EGPWS) ou en vol (TCAS)
- les relations vocales ou automatiques avec le contrôle de trafic aérien (ATC)

Ce système introduit aussi des limitations incluses dans le domaine de vol, par exemple la limitation de vent de travers à l'atterrissage.

5^{ème} système : Les autres mobiles et leur régulation

Un avion n'est pas seul dans l'espace. Il évolue au milieu d'autres aéronefs, plus ou moins éloignés de lui.

La sécurité impose une coordination des trajectoires en espace et en temps, et d'autre part la conscience de sa situation par rapport aux autres pour éviter les collisions.

La coordination des trajectoires est assurée par le contrôle au sol, l'ATC (Air Traffic Control) au moyen d'échanges d'informations orales ou alphanumériques (Datalink).

L'anti-collision est assurée par l'ATC à moyen terme et par des dispositifs internes à l'avion de détection des obstacles aériens proches (Traffic and Collision Avoidance System, TCAS).

Le problème d'optimisation de l'ensemble des trajectoires et de la sécurité en découlant est aujourd'hui une préoccupation mondiale majeure.

6^{ème} système : L'avion interne, ses systèmes, la présence humaine

C'est l'intérieur de l'avion lui-même, ses équipements, ses systèmes avec la présentation de leurs informations pertinentes pour la conduite du vol, leurs procédures d'utilisation et leurs dysfonctionnements éventuels.

Avec aussi les personnes s'y trouvant, et leurs problèmes éventuels. :

- les pilotes en équipage, au cœur de cette thèse, avec le partage des tâches et l'aide mutuelle ;
- le personnel commercial ;
- et bien sûr l'essentiel, les passagers.

2.3 – L'INTERFAÇAGE OPERATIONNEL ENTRE CES SYSTEMES

Cette présentation a seulement pour objet de montrer combien il est difficile de traiter « simplement » et « de l'extérieur » le comportement des pilotes.

La partie la plus aisée est la combinaison des 4 premiers systèmes se présentant de façon scientifiquement très simple : au travers des équations de la mécanique du vol !

Il n'est pas difficile de se rendre compte que les variables en cause ne sont pas toutes indépendantes et qu'en situation dynamique et rapidement évolutive il y a des transferts pouvant être complexes entre leurs valeurs instantanées et leurs influences, et il faut donc les rendre aisément perceptibles et compréhensibles au pilote.

Il utilise opérationnellement ces systèmes grâce au traitement d'informations pertinentes, présentées, perçues et analysées de façon correcte.

* Il a suivi une éducation et une formation correctes, après une sélection initiale relativement poussée. Il est important de noter que la formation en question est sujette à des normes définissant internationalement ses minima. Cela donne une population mondiale de pilotes présentant des caractéristiques de base minimales communes malgré de grandes diversités sociologiques, culturelles, ou simplement dues aux programmes de formation.

* Le choix des paramètres de pilotage présentés aux pilotes est le résultat d'une évolution historique concrète, compromis entre les habitudes opérationnelles acquises au cours des 60 dernières années dans le monde entier, les progrès technologiques, la réduction permanente des coûts et une certaine standardisation mondiale. Ce n'est donc pas l'optimum mais c'est le meilleur compromis jusqu'à présent acceptable pour l'efficacité et la sécurité de la génération d'avions considérée.

* Les perceptions utilisées sont analysées au Chapitre 3.5.8.

* Afin de pouvoir expliquer les situations décrites dans les cas analysés nous retenons l'exemple de l'instrumentation des A330, la plus avancée dans les cas choisis, en ne traitant ici que l'instrumentation concernée par les actions de courtes durées observées.

Sur l'A330 (Airbus, 2008) les systèmes 1 et 3 sont principalement repérés sur le PFD (Primary Flight Display) permettant le pilotage à court terme, dont l'image est donnée ci-dessous dans une phase de montée après décollage.

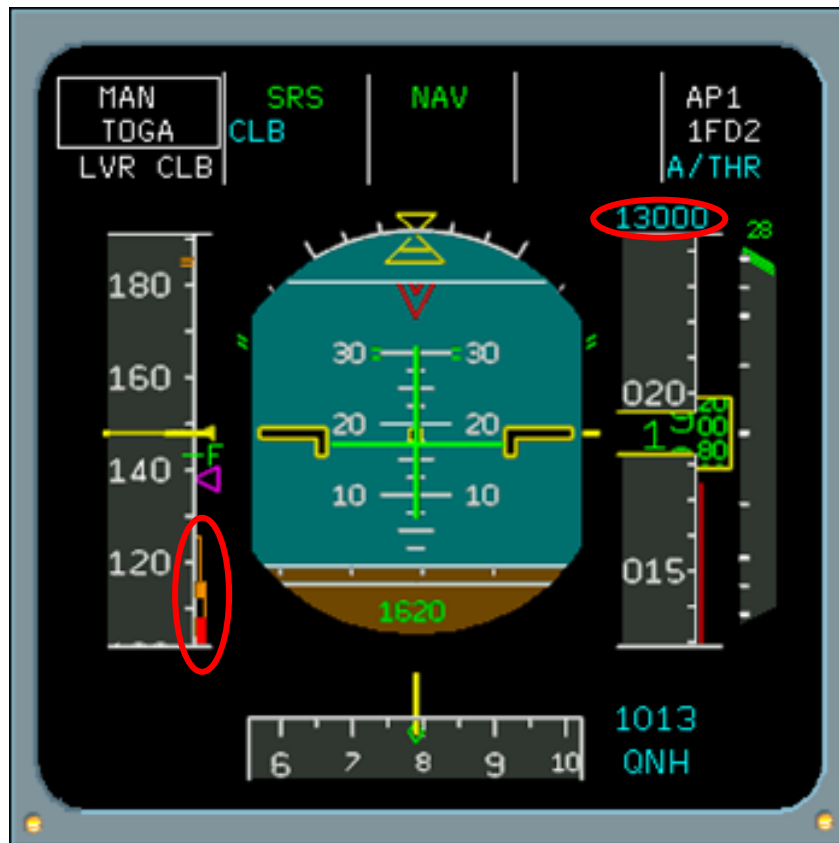


Figure 1 : Exemple de PFD de l'A330

On trouve en haut un bandeau à 5 cases donnant l'état actuel des automatismes de vol, et en-dessous dans la partie principale les paramètres de vol disposés suivant 4 zones d'après un standard international.

De gauche à droite l'échelle des vitesses conventionnelles VC, l'horizon artificiel HA, l'échelle des altitudes Z avec à droite à son côté celle des vitesses verticales Vz ; notez en haut de l'échelle des Z l'indication en bleu de l'altitude de stabilisation sélectionnée (ici 13000 ft, repérée).

De haut en bas l'horizon artificiel qui est l'instrument clé de positionnement angulaire dans l'espace, gradué en degrés d'assiette longitudinale Θ et d'inclinaison en roulis Φ (en haut), et l'échelle des caps (en bas).

Notez sur l'horizon artificiel les barres croisées vertes du directeur de vol FD (Flight Director) donnant des ordres de pilotage en fonction des automatismes en service. Notez aussi sur l'échelle des vitesses conventionnelles VC l'apparition au bas d'une bande colorée en ambre et rouge indiquant la limite inférieure de vitesse autorisée (ici 115 kt, repérée).

* Le système 4 est présenté en grande partie sur le ND (Navigation Display) sur lequel les projections horizontales des trajectoires par rapport au sol, celle désirée (donnée par les aides radio ou le FMS, Flight Management System) et la trajectoire réelle (inertie, GPS), sont figurées avec indication des distances et des angles de cap et de route. On y trouve en haut et à gauche (repérées) les vitesse sol Vsol (GS, Ground Speed, ici 127 kt), vitesse air Vair (TAS, True Air Speed, ici 138 kt) et celle du vent en direction et en amplitude (ici 15 kt, venant de 273°). Il concerne le pilotage à moyen terme.



Figure 2 : Exemple de ND de l'A330

* Le PFD figuré ci-dessous porte aussi des indications de positionnement par rapport à des axes fixes dans l'espace (ILS, route VOR ou FMS) par des indications (repérées, ILS) d'écarts sur l'horizon artificiel, verticaux à droite et horizontaux en bas, ainsi que grâce aux barres du FD. Ce sont des informations nécessaires au pilotage court terme. De plus la hauteur géométrique est donnée par un radio altimètre en bas de l'horizon (ici 1790 ft, repérée).

La figuration ci-dessous montre une approche ILS.

Notez sur l'échelle des vitesses conventionnelles VC l'apparition en haut d'une bande de couleur rouge indiquant la limitation de vitesse conventionnelle maximum pour la configuration choisie d'hypersustentateurs (ici 183 kt, repérée).

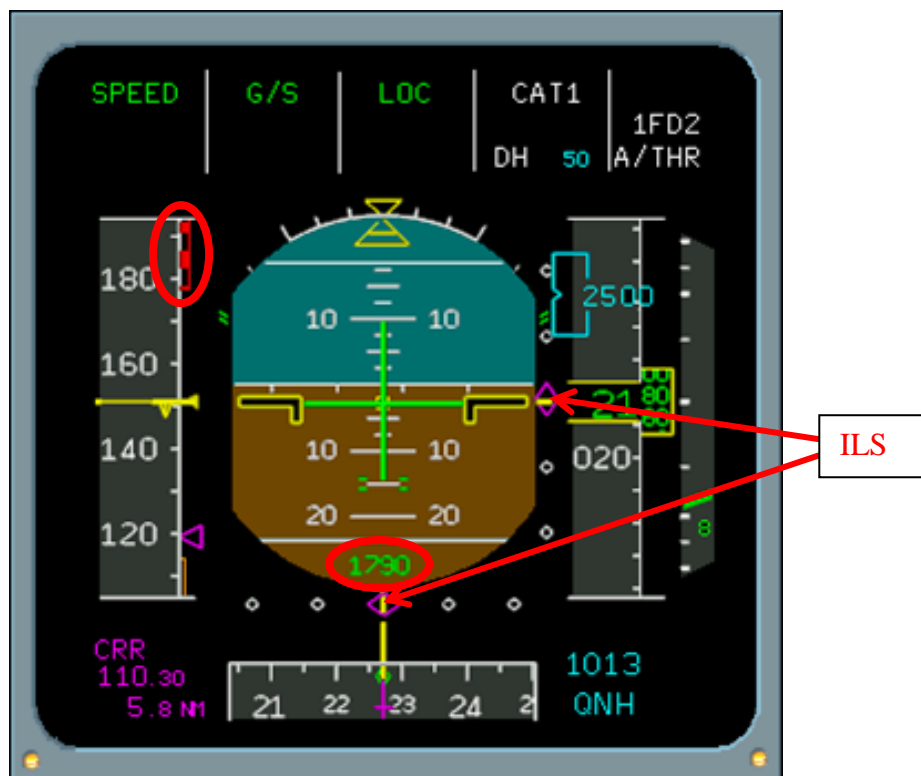


Figure 3 : Exemple de figuration d'une approche ILS

* Ainsi sur le PFD plus de 50 informations différentes, symboliques ou quantitatives, peuvent être figurées suivant les cas de vol et les sélections. Sur les 2 exemples montrés chaque figuration en comporte 30 environ. Notez aussi la diversité de ces informations, modes de fonctionnement des automatismes, symbolique spatiale avec l'horizon artificiel, grandeurs numériques de paramètres (Θ , Φ , γ , VC, Z, Cap, radio-altitude repérée), indications de sens et d'amplitude de variation des certains paramètres (vecteur accélération de VC, Vz, écarts ILS), symbolique de limitations (sur VC), repérage des objectifs (VC et Z objectifs), rappel de sélection (ILS, hauteur de décision DH).

L'utilisation de codes de couleur, l'arrangement, les contrastes, les échelles, l'ergonomie de cet instrument en font un chef-d'œuvre ergonomique de références visuelles.

La sélection des modes automatiques est indiquée sur le haut du PFD.

* Le système 2, commandé par les manettes des gaz, est repéré par les indications des régimes (donc des poussées) des moteurs (taux de pression EPR, vitesse de rotation du mobile basse-pression N1, température d'éjection des gaz EGT, etc.) placées sur l'écran de l'ECAM (Electronic Centralized Aircraft Monitoring) entre les panneaux des deux pilotes.



Figure 4 : Ecran ECAM A330 montrant les paramètres de conduite des moteurs

2.4 – COMMENT LE PILOTE INTEGRE CES SYSTEMES

* Dans les cas traités dans la thèse le problème essentiel du pilote est multiple :

- connaître à chaque instant sa trajectoire et sa position par rapport à l'espace environnant, en distances et en position angulaire,
- contrôler cette trajectoire et vérifier qu'elle est conforme aux prévisions ou aux intentions,
- connaître ses marges par rapport aux limitations diverses,
- planifier et contrôler sa phase de vol,
- faire face à tout imprévu.

Donc l'élément essentiel est la connaissance exacte de la situation (par rapport aux exigences de la phase de vol, de l'environnement, des limitations du domaine de vol et de l'environnement), la meilleure conscience de situation possible. Cette conscience de situation est bâtie à l'aide de la figuration mentale obtenue en associant de façon pertinente les différents paramètres cités, avec leur évolution rigide orchestrée par les équations de la mécanique du vol qu'il doit donc « assimiler » et gérer.

* Mais cela n'est pas suffisant car le pilote doit aussi lier cette maîtrise de la situation aux ordres qu'il donne manuellement au travers des commandes de vol, par l'acquisition des habiletés requises.

L'ensemble indissociable des habiletés et des assimilations et reconstitutions mentales, liées aux habiletés, sont obtenues à la suite d'une expérience concrète en formation en vol et au simulateur de vol. C'est donc au cours de cette période que se bâtissent les modèles mentaux complexes nécessaires, consolidés ensuite par l'expérience opérationnelle.

* Dans le domaine de l'habileté gestuelle associée à des objectifs de stabilisation ou d'interception il est important de détecter les tendances, c'est-à-dire les vitesses de variation des paramètres de pilotage, c'est-à-dire leurs dérivées en fonction du temps. L'exploitation de ces tendances par le cerveau est reconnue. Ainsi sur le PFD ces tendances sont exploitées de deux manières :

- la perception visuelle du défilement des échelles vers un objectif inséré au préalable et repéré (en bleu sur l'exemple ci-après, 320 kt en vitesse conventionnelle VC, et le niveau FL, Flight Level, 330 en altitude, c'est-à-dire 33000 ft),
- l'indication quantitative symbolique de la dérivée, pour l'altitude avec la vitesse verticale Vz (ici 1300 ft/min en montée) et pour la vitesse conventionnelle VC par un segment jaune indiquant la vitesse qui sera atteinte dans 10 sec (ici 311 kt en accélération).

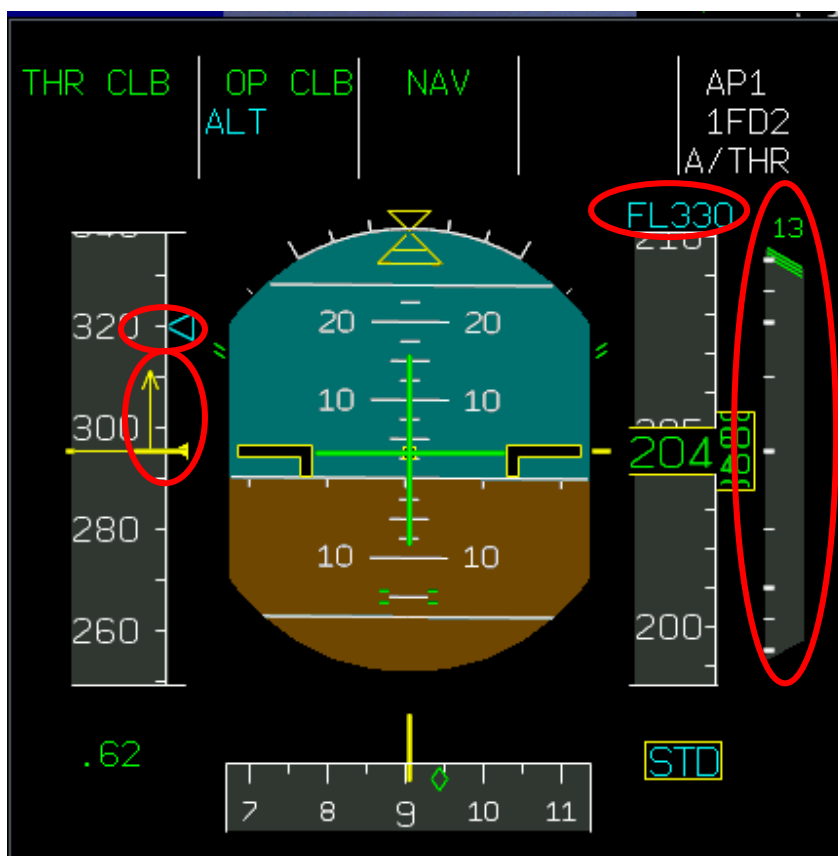


Figure 5 : Affichages et tendances

2.5 – REMARQUES SUR LES FIGURATIONS

* Le terme figurations désigne les images symboliques des paramètres présentées au pilote. Ces figurations concentrées et très étudiées au plan de l'ergonomie visuelle et cognitive ont un gros avantage sur les anciens panneaux de bord où les cadrans des instruments occupaient l'entière surface avec un seul paramètre de vol par cadran³ : elles permettent un balayage visuel moins dispersé et leur imagerie permet d'y concentrer un plus grand nombre d'informations et donc de mieux les exploiter. Cependant quelques particularités sont observées.

* Les automatismes ont remplacé pas mal de tâches manuelles ou intellectuelles du pilote, par exemple la stabilisation de vitesse, de poussée, d'altitude, de vitesse verticale, de pente, de virage, l'interception d'altitude, d'axes radioélectriques, le suivi de trajectoires inertielles ou calculées, les prévisions d'horaires de passage, de consommation de carburant, etc. Très vite le problème s'est posé au pilote de suivre et de contrôler la bonne exécution de ces actions automatiques.

D'abord les écrans de pilotage à court terme (tactique), le PFD, et de pilotage à moyen terme (tactique et stratégique), le ND, sont adjacents, permettant une rapide surveillance de l'ensemble des paramètres de vol. Ensuite sur le PFD on a placé le bandeau supérieur donnant un aperçu symbolique de l'état des automatismes de conduite : sélection des systèmes, état d'attente, d'interception, de stabilisation, c'est-à-dire l'information nécessaire dans le court terme pour savoir comment se comportent (et/ou doivent se comporter) les systèmes de pilotage immédiat.

Cependant une enquête menée dans les années 80 pour le compte d'Aéroformation par *Jean-Claude et Nicole Wanner* et *Pierre Lecomte* a montré que le mélange sur un même écran d'informations sémantiques (état des systèmes) et quantitatives (paramètres de vol), symboliques ou pas, ne menait pas spontanément à leur exploitation coordonnée sinon simultanée. Une formation particulière est nécessaire pour une utilisation correcte.

³ Le cas n°3 de l'Annexe 2 donne une vue du panneau pilote de Concorde avec ce type d'instrumentation

3 – METHODE ET MODELE COGNITIFS ADOPTES

3.1 – DEMARCHE CHOISIE

Le Chapitre 3 donne les détails sur les concepts choisis, puis sur la méthode et le modèle utilisés.

Il a fallu innover pour répondre à 5 problèmes.

1. Nous voulons analyser les comportements de personnes dont nous ne connaissons pratiquement rien, ni de leur personnalité, ni de leur état physiologique et psychologique au moment des actions observées.
L'analyse cognitive fine doit pouvoir atteindre les phénomènes psychologiques élémentaires, quel que soit l'état affectif présent des acteurs dont nous analysons les comportements dans les accidents et incidents choisis. Mais il faudra en extraire des résultats admissibles débouchant sur des hypothèses sérieuses.
2. Les concepts psychologiques que nous avons consultés (Chapitre 3.3) sont déduits en grande majorité d'observations « externes » aux individus, alors que les comportements sont l'expression de réactions internes complexes biologiques, chimiques, électriques au sein du cerveau. Ils sont donc difficiles à utiliser dans des brèves séquences de tâches telles que celles traitées dans cette thèse.
Nous avons cependant répertorié un ensemble de concepts psychologiques pouvant être utilisés valablement dans les analyses, en vérifiant leurs limites de validité quand c'est possible.
3. L'analyse scientifique d'un type de comportement impose la rigueur dans le choix des hypothèses, des méthodes choisies et de leur application, mais nous n'avons aucun laboratoire à notre disposition, ni aucun cobaye sur qui les valider.
D'autre part la meilleure façon d'observer les actions internes est de faire parler les acteurs eux-mêmes. D'où l'utilisation intensive des connaissances d'experts dans les analyses. Les analyses et leur évaluation ont donc été établies par l'utilisation de la seule expertise, celle du rédacteur et celle des professionnels consultés pour valider les hypothèses des analyses. Son utilisation, entourée de précautions assurant sa validité, a été efficace.
4. Malgré de nombreux concepts réputés dynamiques nous n'avons rien trouvé dans la littérature consultée concernant l'analyse de comportements complexes élémentaires dans des durées très brèves d'action, de l'ordre de quelques dixièmes de secondes à quelques secondes.
La brièveté des délais d'action impartis aux acteurs des cas analysés est à la fois un avantage et un inconvénient pour la thèse. Avantage, car l'urgente nécessité d'agir efface ou au moins diminue en grande partie les influences possibles des paramètres autres qu'opérationnels. Inconvénient, par l'absence de modèles cognitifs susceptibles de traiter une analyse fine dans des durées de quelques secondes. Il fallait donc en bâtir un original qui soit adapté.

5. Nous voulons appliquer une logique rigoureuse dans le maniement de concepts souvent flous, a priori plus intellectuels que concrets. Ceci amène à une rationalisation des mécanismes de l'analyse, analogue à celle utilisée par les ingénieurs, en se rappelant que cette démarche revêtant un aspect rationnel mais s'appliquant à des hypothèses « semi-dures » n'est qu'approximative même si elle s'avère efficace.

Pour mener une telle analyse, des outils logiques ont été définis ici. L'utilisation d'outils analogues, de types mathématique ou physique, n'est pas une première en analyse psychologique ou psychophysique (Allen, 1991 ; Bonnet, 1986 ; Boy, 1998 ; Dehais, Lesire, Tessier, & Chaudron, 2000). Ils s'avèrent efficaces, mais il ne faut pas oublier que ce ne sont que des outils en support d'hypothèses, pouvant être remplacés par d'autres lorsque les connaissances en neuropsychologie auront avancé. Cependant ils ouvrent peut-être un chemin vers une rationalisation des comportements.

3.2 – L'INDISPENSABLE MODELISATION

Cette thèse se situe en partie au carrefour de la psychologie ergonomique ou bien de la psychologie cognitive expérimentale.

Elle revêt de plus un aspect clinique par l'analyse de cas réels et concrets et surtout elle introduit le temps physique comme paramètre clé. De ce fait la méthodologie adoptée s'écarte obligatoirement des classiques et il a donc fallu rechercher une modélisation spécifique.

La nécessité d'une modélisation découle de deux constats :

- Pour essayer d'extraire ce qui est important dans la compréhension des comportements en situation soudaine, inattendue, rapide et dangereuse à partir des cas ayant servi de support concret pour la thèse il fallait avoir un modèle d'analyse adapté, rationnel et autorisant à la fois l'examen du détail, c'est-à-dire du plus petit élément possible de comportement cognitif parmi l'ensemble observé du comportement, et l'introduction du temps réel comme paramètre essentiel.
- Puis, au fur et à mesure de l'avancement du travail, l'orientation de la recherche a obligé de raffiner la méthode et son modèle, c'est-à-dire d'étudier en détail le modèle de comportement cognitif lui-même en vue d'approfondir la connaissance de ce comportement sur une échelle de temps de l'ordre de la seconde à quelques secondes.

Ce modèle a été construit à partir d'un ensemble de concepts acquis en psychologie que nous évoquons plus loin et détaillés dans ce Chapitre 3, mais aussi en tenant compte des très nombreuses observations in situ de comportement de milliers de pilotes soumis aux contraintes de situation semblables à celles de la thèse, c'est-à-dire en utilisant l'expertise. Ces observations professionnelles, faites par nous-mêmes et les instructeurs au cours de la formation des équipages de Concorde et des Airbus à Aéroformation entre 1971 et 1994, n'ont pas été répertoriées officiellement car s'adressant à des objectifs de performance immédiate, la formation rapide de pilotes de compagnies aériennes. En revanche leur application concrète a permis l'édification de méthodes et de programmes performants de

formation. Elles restent un acquis expérimental indéniable au vu des résultats obtenus dans la formation des pilotes.

Nous faisons d'emblée les remarques suivantes :

- Chacun de ces concepts a été étudié et défini très précisément parfois depuis plusieurs décennies pour étudier une particularité du fonctionnement cognitif. Ils ont aussi évolué au fur et à mesure de l'acquisition de nouvelles observations, mais souvent séparément les uns des autres. Or ils s'appliquent pratiquement tous simultanément, à des degrés variés, à l'analyse qui est le thème de la thèse. Il faut donc les utiliser ensemble mais en jugeant de la validité de leurs limitations rarement mentionnées dans les exposés théoriques.
- Leur imbrication dans l'étude du comportement opérationnel oblige à en faire une synthèse, dont le modèle choisi exprime implicitement leurs interventions sans avoir à continuellement les expliciter.
- Et surtout aucun ne s'applique exactement à l'échelle de temps des phénomènes étudiés ici, de durée inférieure à la minute et le plus souvent entre 1 et 10 sec.

D'où l'obligation d'innover. Mais aussi celle de valider.

3.3 – CONCEPTS UTILISES

Les concepts utilisés sont donnés de façon détaillée avec leurs références, reportées au Chapitre 10. Nous les avons le plus souvent utilisés de façon permanente et implicite, sans en mentionner constamment l'origine. Cependant certains n'ont pu être appliqués que partiellement parce que n'étant pas adaptés à la brièveté des durées ou parce que parfois contredits par l'observation directe au cours de la vie professionnelle.

Nous les avons classés en 4 catégories qui cependant ont une tendance à n'accepter que des frontières floues et se recouvrant.

Chaque concept est considéré sous deux aspects : un **résumé** le précisant, limité à son utilisation dans la thèse, et la description de l'**usage** que nous en faisons dans les analyses des cas retenus dans le Chapitre 5 et l'Annexe 2.

3.3.1 - Concernant la structure cognitive de base

*** La mémoire.**

- Résumé :

« *C'est la mémoire qui permet à l'Homme de prendre de la distance par rapport au moment présent, de l'évaluer en fonction du passé et de disposer d'une base pour exercer ses facultés d'anticipation et d'adaptation* » (Didier, 1998).

On retient de façon classique trois types de mémoire :

- la mémoire *long terme (Mt)* elle-même multiple :
 - La mémoire déclarative, consciente et explicite avec ses 2 composantes :
- la mémoire épisodique, stockage d'événements avec leur contexte,

- la mémoire sémantique, construisant et modifiant notre représentation du monde et nos relations avec lui.

- o La mémoire implicite, non déclarative avec ses 2 composantes :

- le conditionnement, établissant les connexions entre stimulus conditionnel et réponses,
 - la mémoire procédurale, stockage des représentations sensorielles, des plans d'action, des conduites devenues automatiques, pouvant être utilisée inconsciemment.
 - la mémoire de travail (**MT**), stockage temporaire d'informations avec la capacité de retenir plusieurs types d'informations en même temps.
 - la mémoire court terme (**Mct**), ne retenant les informations que le temps nécessaire à leur utilisation, avec une capacité limitée de stockage.

Pour PA Carpenter et al (Carpenter, Just, & Reichl, 2000):

"...Finally, the emerging view suggests that we reconsider the implicit assumption that there is a fixed, relatively small number of cortical networks to be mapped. Instead, multiple brain regions might combine with each other in vast number of ways, depending on the task requirements and, more generally, on the types of cognitive skills that a person within a culture develops. Whether it be the more arbitrary demands of a n-back task or the less arbitrary demands of solving algebra equations, we can expect that an appropriate network has been configured, whose constituency may well be of interest. Also of interest are the general mechanisms and principles by which the networks come to be configured and refined. In this view, the variety and generativity of human cognition, like the variation observed in other complex adaptive systems, arises from the combinatorics of simpler elements. Thus, a challenge for future research will be to characterize not only the simpler elements, but also the mechanisms underlying the combinatorics, and the nature of the resulting network."

- Usage :

On aurait aimé avoir plus de précision sur le fonctionnement mnémonique du cerveau, mais la classification traditionnelle actuelle donne un bon support aux « mécanismes » que les analyses menées ont utilisés.

Dans nos analyses la référence à la mémoire long terme Mlt est faite sans précision sur ses composantes, car opérationnellement le pilote les utilise indifféremment dans le temps très bref des événements étudiés, avec probablement un accès privilégié aux mémoires déclarative (épisodiques, sémantiques) et procédurale.

La mémoire de travail MT est utilisée par le pilote dans l'exécution d'une mission, d'une phase de vol.

La mémoire court terme Mct a un rôle primordial dans les cas étudiés dans la thèse. Bien que semblant fonctionner en utilisant différentes régions du cerveau nous adopterons une position dictée de l'observation opérationnelle: elle semble fonctionner de façon unitaire, probablement grâce à un effet de synchronisation des aires corticales en jeu (Newman, Just, & Carpenter, 2001).

Admise souvent comme une partie de la mémoire de travail, les analyses fines de brèves séquences ont obligé à la considérer comme un élément séparé. Sa durée de rétention a été prise de l'ordre de 10 à 20 sec, inférieure aux valeurs généralement admises allant jusqu'à la minute. C'est un résultat d'observation expérimentale en formation,

s'appliquant aux cas étudiés ici, dont l'ordre de grandeur est estimé et non mesuré exactement.

* Les modèles mentaux (MM) et les images mentales (IM), et leurs groupements (Mental model patterns MMP).

- Résumé :

Ces notions ont été explicitées par *PN Johnson-Laird* (Giroto, Johnson-Laird, 2005) et reprises par *MF Ehrlich et al* (Ehrlich, Tardieu, & Cavazza, 1993 ; Johnson-Laird, 1983 ; Johnson-Laird & Byrne, 1991). Elles ont été explicitées de façon opérationnelle par *JC Wanner et P Lecomte* (Lecomte & Wanner, 2004). Ce sont des simplifications de la réalité, des cadres, prenant en compte simultanément des connaissances déclaratives et procédurales, utilisables au moment présent pour le sujet traité.

Leur concept a fortement inspiré la définition des logiciels informatiques (Davidson, Dove, & Wertz, 1999).

Les images mentales IM permettent de « voir » en l'absence de stimuli visuels. Elles permettent une simulation mentale. Elles sont liées à la perception mais ne changent pas dans le temps alors que les modèles mentaux MM peuvent se modifier suivant l'usage qu'on en fait.

- Usage :

Ce sont les cadres mémorisés des actions cognitives animées par les fonctions cognitives. Cette notion est amplement utilisée dans la thèse en recevant des précisions ainsi qu'on le verra ci-après.

Il est intéressant de remarquer qu'après avoir inspiré la formalisation des logiciels informatiques, ces derniers inspirent la nécessité de mieux expliciter la nature des modèles mentaux les ayant initiés.

* Les actions conscientes et inconscientes.

- Résumé :

Les différences entre les actions conscientes et inconscientes ont été amplement étudiées, par *B Baars* en particulier (Baars, 2005). Cette structure est mise en évidence par les modèles de *J Rasmussen* (Rasmussen, 1986) avec le processeur séquentiel conscient, et les 3 niveaux d'intervention : habiletés, règles, connaissances (Skill, Rules, Knowledge). *P Lecomte et JC Wanner* (Lecomte & Wanner, 2004) en traitent largement dans leurs descriptions de phénomènes opérationnels. On doit aussi citer le modèle DSM (Dynamic Situation Management) reprenant le modèle de Rasmussen (Hoc & Amalberti, 1999) de façon moins « cinématique ». Malheureusement ce modèle, bon pour la description de phénomènes de durée supérieure à la minute, n'est pas suffisamment détaillé pour des situations de durée inférieure à la minute.

Le cerveau présente des caractéristiques neuropsychologiques intéressantes posant un problème de cohésion logique. Il s'agit de simultanités et de discriminations des perceptions, de traitement en réseau des informations, de saturation de ces traitements, des caractéristiques variables et mélangées de traitements séquentiels et parallèles, de volatilité

de la mémoire de travail, et du « raccordement » aux résultats de la psychologie classique. Cela ne semble pas remettre en cause les « schémas » des modèles de Rasmussen, mais ces derniers doivent cependant être revus en fonction de la synthèse des données actuelles (Parasuraman & Rizzo, 2008).

- Usage :

Cette notion est amplement utilisée, et elle est explicitée dans la thèse.

Le schéma utilisé plus loin de « processeur opérationnel » étroitement associé à la mémoire de travail, plus particulièrement à la mémoire court terme, semble ainsi approprié. En revanche on ira en profondeur pour le fonctionnement parallèle inconscient de certaines fonctions et pour leur liaison au fonctionnement séquentiel des fonctions conscientes. Ainsi les actions inconscientes feront l'objet d'une classification particulière, en actions déléguées ou autonomes.

3.3.2 - Concernant les mécanismes cognitifs

*** Le traitement de l'information humaine**

- Résumé :

Les mécanismes de résolution des problèmes ont été étudiés depuis longtemps. On peut citer le modèle d'un espace problème de *A Newell et H Simon* (Newell & Simon, 1972) et l'unité de structure du comportement mental TOTE (Test-Operate-Text-Exit) de *G Miller* (Miller, Galanter, & Pribram, 1960). Toujours avec *Miller* on retient sa limitation mnémonique immédiate des 7 +/- 2 « shunks » (Miller, 1956).

Il faut aussi mentionner la théorie de l'information, fondée par *C Shannon* (Shannon, 1948), utilisée ensuite par l'informatique et par la cybernétique. Cette intéressante théorie mathématique utilisée à des applications matérielles, pourrait s'appliquer, mais plus difficilement, à l'information psychologique. Elle introduit la notion d'entropie d'information.

- Usage :

Ces mécanismes sont utilisés en y intégrant les concepts qui suivent dans la liste.

Le temps a manqué pour utiliser la notion d'entropie d'information, peut-être extensible à celle de capacité cognitive évoquée plus loin (Chapitre 7.3.4).

*** La charge de travail mentale (CTM), (Mental Workload).**

- Résumé :

Un bon résumé sur ce concept est présenté dans un document de psychologie ergonomique (Amalberti, 2001) :

A l'origine, ce concept a été étudié à travers deux facteurs : l'attention, et la mémoire à court terme.

La charge de travail mental dépend de la capacité de l'opérateur, de son taux d'occupation, et de la demande en ressource nécessaire pour l'exécution de la tâche, de sa complexité. Critères d'estimation (de mesure ?):

- sensibilité aux variations de difficulté de tâche ou de demande de ressource,
- diagnostic sur la part de tâche demandant l'augmentation de ressource,
- sélectivité sur l'aspect CTM, éliminant les parts physiologiques et émotionnelles,
- absence d'interaction sur la performance à mesurer,
- fiabilité.

Il ressort que dans une tâche donnée, l'opérateur doit gérer ses ressources dans un domaine étroit (qui dépend toutefois de la motivation pour la tâche), ce qui n'est possible que parce qu'il perçoit, subjectivement, cette charge de travail.

De très nombreux travaux concernent ce concept sans qu'on puisse en tirer une synthèse concrète. On se borne à citer un texte de thèse (De Waard, 1996) paraissant pertinent sur le sujet :

“ Terminology in mental workload research has its roots in cognitive and physiological theories. As a result, the terms used are sometimes unclear, as different authors use the same terms with differing meanings. In this thesis task demands, workload and effort are prime concepts. Task demands are determined by goals that have to be reached by performance. These goals can be defined in general terms such as ‘the aircraft should land safely’. It is important to acknowledge that sub-goals are quite often self-set, e.g., first action A then B (or the other way around), and that giving priority to sub-goals can influence general goals and demand. Workload is the result of reaction to demand; it is the proportion of the capacity that is allocated for task performance. Effort is a voluntary mobilisation process of resources. State-related effort is exerted to maintain an optimal state for task performance while task related effort is exerted in the case of controlled information processing”.

Notez que la thèse en question présente de façon très complète l'ensemble des travaux sur le sujet, sans qu'il soit nécessaire de lister ici leurs multiples références.

- Usage :

Comment la tâche est correctement exécutée est une mesure objective mais comment sa difficulté d'exécution est perçue n'a pas de support objectif. Finalement la charge mentale est directement déterminée par la difficulté de la tâche qui nécessite l'allocation des ressources nécessaires.

Son concept est utilisé de façon permanente et implicite tout au long des analyses. Il ne sera donc nommé explicitement que rarement car faisant partie intégrante des bases utilisées.

En revanche, de façon dérivée des résultats, on s'orientera vers un nouveau concept mis en lumière par les analyses : celui de la capacité cognitive consciente (CCC), explicité plus loin, introduisant le temps comme paramètre additionnel de définition de la charge de travail, concept pouvant déboucher sur une quantification possible.

* **Le partage du temps** (Time sharing), **la théorie des ressources multiples** (Multiple-resource Theory), **les tâches multiples** (Multitasking).

- Résumé :

Les trois notions sont liées, sinon confondues. Il s'agit d'attention divisée entre plusieurs tâches simultanées.

Les travaux de C Wickens, D Cohen (Wickens, 2002 ; Wickens & Mc Carley, 2008 ; Cohen, Wherry, & Glen, 1996) montrent ce qui suit.

Pour les tâches inconscientes « automatiques », par exemple conduite du vélo, il s'agit de grandes habiletés ne demandant pas d'attention consciente permanente. Les ressources de l'attention consciente sont mentales et limitées, et la demande dépend de la difficulté de la tâche et du degré d'automatisme. Les tâches les plus difficiles nécessitent plus de ressources que celles faciles à niveau de performance égal.

Si 2 tâches demandent plus de ressources que disponible l'augmentation de performance sur l'une se fait au détriment de l'autre. Les tâches hautement automatiques ne demandent que peu ou pas d'attention. Elles interfèrent peu avec les autres.

Chaque changement de tâches « coûte » quelque chose et les changements fréquents impliquent une augmentation de ce coût en ressources mentales. Jongler avec 2 tâches est moins efficace que les régler l'une après l'autre.

Les ressources sont réparties entre plusieurs groupements :

- modalités de perception (perceptual modalities), visuelles ou auditives,
- codes de traitement (processing codes), spatial ou verbal,
- phases de traitement (processing stages), traitement de perception et traitement central ou réaction manuelle ou vocale.

Il y a interférences entre 2 tâches si elles utilisent les mêmes moyens d'exploitation (stages). Perception, mémoire de travail, cognition appartiennent à la même famille ; sélection et choix d'une réponse appartiennent à une autre. Il est aisé d'utiliser 2 modalités différentes pour 2 tâches, vue et audition par exemple. L'inverse est aussi vrai.

Ces résultats pour les modalités se retrouvent pour les 2 codes : verbal et spatial.

Cela permet une prévision sur les performances de tâches multiples (Multi-task Performance) (Wickens & Mc Carley, 2008).

L'allocation des ressources mentales et les performances associées ont été estimées dans des situations de stress (Van Hiel, 2007).

De façon plus opérationnelle les travaux d'Eurisco en 1998 (De Brito, Pinet, & Boy, 1998) montraient combien le cours de tâches importantes comme l'exécution des check-lists était mis à mal par de nombreuses autres tâches simultanées tout aussi prioritaires. Plus récemment les travaux de *L Loukopoulos et al* (Loukopoulos, Dismakes, & Barshi, 2009) ont extrapolé cette interférence à l'ensemble des tâches dans le cockpit, montrant aussi l'impossibilité d'exercer des tâches conscientes simultanées.

- Usage :

L'utilisation de ce concept est aussi permanente et implicite que celle du concept de charge de travail mentale, avec les mêmes remarques que pour ce dernier. Toute action consciente demande de l'énergie cognitive (à définir !) et du temps physique.

Cependant les cas de pilotage analysés amènent à traiter plus de 2 tâches simultanées et donc à généraliser le concept. Nous verrons qu'il y a obligation pour le pilote de « jongler » avec plusieurs tâches ou sous-tâches simultanées, d'où quelques problèmes lorsqu'il s'agit d'actions conscientes.

Une analyse des éléments de temps passés sur chacune des tâches permet d'avoir une idée de la charge de travail pour chacune d'elles.

* **Le système cognitif associé** (Joint cognitive system).

- Résumé :

Toujours dans le document de psychologie ergonomique de R. Amalberti (Amalberti, 2006) : « A la suite des travaux de Rasmussen, Hollnagel & Woods (Hollnagel & Woods, 2005 ; Woods & Hollnagel, 2006) cherchent à modéliser l'adaptation dynamique des opérateurs en fonction de la situation, à partir d'une conception de l'intelligence centrée sur la flexibilité et les capacités d'adaptation. La flexibilité est liée à la fois à la capacité à changer de niveau (au sens du modèle SRK, skill, rules, knowledge) et à la variété des règles d'action disponibles. Ces auteurs décrivent le système technique selon les mêmes critères que l'opérateur (savoir faire, capacités d'apprentissage, règles, etc.). Le système opérateur-machine peut alors être décrit comme un joint cognitive system, système couplé entre deux agents cognitifs ; et c'est la performance du système qu'il importe d'optimiser. Cette approche permet de tenir mieux compte de la répartition des rôles entre l'homme et la machine, et notamment des changements introduits lorsqu'on modifie l'un des composants (en l'occurrence, la machine).

Le problème de la gestion dynamique des situations a également été repris par Hollnagel, qui décrit le processus en fonction de l'anticipation, qui peut se faire à différents niveaux :

- ☐ stratégique (planification sur le long terme) ;
- ☐ tactique (exécution procédurale, basée sur une planification à moyen terme) ;
- ☐ réactif (exécution réactives, à court terme, en fonction des événements de l'environnement) ;
- ☐ aléatoire (situation de panique) ».

- Usage :

Le thème de la thèse repose sur le comportement de l'ensemble opérateur-système et cette démarche le sous-tend. Notez qu'ici l'ensemble en question comprend en coopération des « agents » aussi bien humains que matériels. Cependant les niveaux proposés ne sont pas totalement applicables à la brièveté des événements. L'analyse sera pragmatique avec l'utilisation du concept suivant, d'agents, qui inclut celui de système cognitif associé..

* **Les agents et fonctions cognitives associées.**

- Résumé :

Cette notion, introduite par G Boy (Boy, 2008), permet de gérer des situations opérationnelles complexes en prenant le temps comme paramètre primordial. De plus elle permet d'utiliser les différences notées par J Leplat et JM Hoc (Leplat & Hoc, 1983) entre la tâche prescrite et de la tâche effective.

Le concept des fonctions cognitives doit permettre (on le verra plus loin), sinon d'établir aujourd'hui le pont au moins de lancer une passerelle entre les deux mondes, psycho-physiologique et matériel, reliés uniquement par des échafaudages psychologiques. Pour l'instant l'existant s'appuie sur ces échafaudages.

- Usage :

La notion sous-tend cette thèse et elle est développée plus loin.

La différence entre les tâches prescrite et effective sera exploitée pour expliquer les déviations dans les comportements.

D'autre part la fonction cognitive sera prise comme base de l'introduction dynamique, fonction du temps, du comportement opérationnel.

3.3.3 - Concernant la manifestation de ces mécanismes cognitifs

*** Les choix et la probabilité subjective.**

- Résumé :

Les travaux sur ce sujet (Tversky & Kahneman, 1974, 1981 ; Kahneman, Slovic, & Tversky, 1982) concernent le jugement d'un événement basé sur sa représentation, la disponibilité d'éléments de jugement et « l'ancrage » du raisonnement sur les éléments de départ du jugement.

Ils portent sur la probabilité subjective d'un événement, et sur les déviations introduites par des jugements heuristiques basés sur trois phénomènes principaux : la représentation de l'évènement, la disponibilité d'éléments de jugement et l'ancrage du raisonnement sur des éléments de départ de ce jugement. Le propos est orienté sur l'exploitation de jugements « tranquilles », sans stress, avec un temps suffisant pour y réfléchir. Les conclusions en sont :

- la probabilité subjective d'un événement est définie par l'ensemble des « paris » sur l'évènement qu'on veut accepter ;
- pour un événement donné cette probabilité subjective varie avec les individus ;
- elle détermine une préférence parmi les « paris » sans cependant en dériver.

D'autres travaux ont montré que le choix de solution « gagnante » impliquait moins d'effort cognitif que celui de solution « à risque », et que la mémoire court terme était ainsi probablement impliquée (Gonzalez, Dana, Koshino, & Just, 2005).

- Usage :

Le concept, attaché à celui de diagnostic, est utilisé dans les choix « immédiats » des modèles mentaux pris en compte pour mener les actions nécessaires. Bien que les travaux en question portent sur des séquencements de durée très au-delà de celles envisagées ici, cette notion peut s'appliquer aux focalisations d'attention.

L'important n'est pas de déterminer statistiquement comment et quand ce phénomène survient, mais de savoir pourquoi et dans quelles circonstances il apparaît. L'objectif est de savoir comment le maîtriser, ou comment l'anticiper, ou comment en réduire les conséquences fâcheuses s'il en existe.

Le problème reste de savoir ce qu'est la solution gagnante dans le diagnostic immédiat. Nous verrons que son choix, toujours « estimé », doit être ultra-rapide.

Remarque : Dans les choix l'analyse du risque joue un rôle important. Cependant cette analyse n'est pas de mise dans les situations de la thèse. Le danger étant là, évident et incontournable, le seul risque pris en compte est celui de ne pas sortir de la situation dangereuse, ce qui automatiquement engendre le stress (voir plus loin).

* L'influence du contraste.

- Résumé :

Extrapolation au cognitif du seuil psychophysique de *Bouguer-Weber* (Bonnet, 1986). On voit poindre ici une notion nouvelle, celle d'un seuil de résistance à la perception de stimuli autres par exemple que ceux alimentant une focalisation de l'attention. Cette notion a été définie en psychophysique pour des sensations physiologiques, par le rapport de seuil différentiel de *Bouguer-Weber* : $\Delta I/I = k$ pour une valeur de seuil ΔI rapportée au stimulus de base I à partir de la fonction de *Weber-Fechner* (Weber-Fechner, 2010): $S = k \cdot \log I$ où S est la sensation et I est le stimulus. Une variation n'est perçue qu'au-delà de ce seuil proportionnel à l'intensité présente du stimulus en action.

- Usage :

Ce concept semble convenir dans l'abandon de la focalisation. Le seuil mental nécessaire serait une extrapolation physio-psychologique de cette notion de seuil physiologique. Il serait d'autant plus élevé que l'intensité de la focalisation est forte.

* Les priorités sous stress.

- Résumé :

Depuis longtemps le stress a été montré comme l'élément majeur dans la liste des facteurs humains affectant le comportement des pilotes (Alekseev & Sviridov, 1990).

D'après *P Corten* (Corten, 1996) :

« *Henri Laborit* (Laborit, 1981) définit le stress comme toute situation où l'individu ne peut ni fuir, ni attaquer.

Pour Turcotte, le stress est le résultat de la transaction entre l'individu et son environnement. Pour qu'il y ait stress, il faut que la situation ait un certain enjeu et sa résolution doit comporter un certain degré d'incertitude. Dans ce cas, le stresser mobilise d'une part de l'énergie et, d'autre part déclenche des émotions. Le stress résulte de l'impossibilité de dégager l'énergie nécessaire ou de répondre adéquatement à l'émotion provoquée par le stresser. C'est donc la capacité de la personne à affronter la situation qui déterminera l'importance de ses réactions psychologiques ou physiologiques, bien plus que la nature du stresser lui-même. On notera que, dans ce genre de définition, toute la responsabilité face à la décompensation est portée sur l'individu et non sur l'organisation du travail qui peut en être la cause. »

« *Syndrome Général d'Adaptation* (Wikipedia, 2010) :

Selon Eric (1994) ou encore Henri Laborit, les réponses comportementales innées préservant l'intégrité de l'organisme face à la menace sont la fuite et l'attaque. Ce sont deux moyens d'éviter la situation menaçante. Dans cette optique, la réaction physiologique de stress est totalement adaptée à la favorisation de telles réponses. En effet, les réponses physiologiques de stress préparent l'organisme à la fuite, à l'attaque ou encore à l'endurance de la situation menaçante.

Hans Selye est le chercheur qui a rendu populaire la notion de stress physiologique. Il a pu montrer que lorsque l'équilibre homéostatique est perturbé par une demande environnementale, l'organisme réagit toujours par une double réponse. La première est spécifique et correspond à une réponse propre aux demandes environnementales, tandis que la deuxième est non spécifique car elle est identique en toutes situations. Cette dernière est une réponse innée et stéréotypée qui se déclenche d'elle-même dès que l'homéostasie est perturbée. Ainsi peu importe que l'agent stressant soit d'origine physique ou psychique, interne ou externe, objectif ou subjectif, plaisant ou déplaisant, la réponse non spécifique, physiologique, humorale et endocrinienne, sera toujours la même :

Le fait que l'agent (ou situation) que nous rencontrons soit plaisant ou désagréable n'est d'aucune importance ; la seule chose qui compte c'est l'intensité de la demande de réajustement ou d'adaptation.

Cette réponse non spécifique, Selye a pu l'observer au cours de ses études médicales dans les années 1920 (raconté dans Le stress de la vie, 1975). »

On voit ainsi que ce phénomène de stress est accompagné de perturbations physiologiques et neurologiques importantes qui gèrent les réactions de l'acteur autant qu'elles sont initiées par lui face à une situation. « *La séparation entre l'esprit et le corps est sans doute un des concepts les plus difficiles à détruire, car fondé sur une apparente évidence.* » (Laborit, 1981). Dans le même ouvrage H Laborit traite de l'inhibition de l'action par le stress.

Résultat important : **le stress amène à un retour vers l'adoption de règles simples dans l'exécution des tâches impliquées (one-dimensional rules).**

On essaie d'estimer les ressources mentales sous stress (Parasuraman & Rizzo, 2008 ; Szalma & Hancock, 2003).

La mémoire semble affectée par le stress (Wickens, Gordon, & Liu, 1998):

"Working memory capacity appears to decrease under stress. Under stress, working memory appears to be less available for storing and rehearsing information, and less useful when performing computations or other attention-demanding tasks."

- Usage :

Tous les cas traités dans la thèse sont sous stress à partir de l'apparition de l'évènement déclencheur. Les priorités adoptées alors rejoignent plus ou moins le concept de probabilité subjective.

On prendra en compte ce type de comportement : emprisonné dans une situation critique on essaie « d'attaquer » cette situation pour en sortir. Cependant, bien que le rédacteur ait observé en vol chez des pilotes le phénomène limite d'inhibition, dans ces cas traités l'inhibition fait place à la focalisation de l'attention. Ou à l'inverse la focalisation serait-elle un cas d'inhibition ?

Un point intéressant est que, d'après H Selye (Selye, 1956) le stress est toujours accompagné d'une réponse physiologique non spécifique. Peut-on l'extrapoler au psychologique (voir Chapitre 7) ?

* La décision identifiée primordiale (RPD Recognition-primed decision) (Klein, 1999 ; Klein & Rouse, 1989).

- Résumé

Ce processus est basé essentiellement sur l'expérience et l'expertise.

Le modèle utilisé identifie une réaction raisonnable comme la première à être considérée immédiatement. La décision suit 2 chemins, l'identification du type pertinent d'action et l'évaluation par l'imagination de la pertinence des actions en découlant.

3 variations du modèle :

- version 1, reconnaissance du type de situation et connaissance de l'ensemble des buts, priorités et des pas correspondants. « if...then » réaction.
- version 2, la situation pose plus de souci par ses complications éventuelles que le cours de l'action et le but. « if ???...then » réaction.
- version 3, la situation est reconnue mais le cours des actions n'est pas connu. Les conséquences d'une réaction sont considérées par simulation mentale. Là se trouve l'inexpérience. « if...then ??? » réaction.

- Usage :

Le très court délai accordé aux décisions rend ce concept assez peu utilisable dans les cas retenus (sauf peut-être dans le cas n°3 de l'Annexe 2).

* La gestion de tâches multiples

- Résumé :

Ceci rejoint le sous-chapitre « Le partage du temps, la théorie des ressources multiples, les tâches multiples ».

Ce concept se rattache à ceux des choix et des décisions (Chauvin, 2003).

Le choix des priorités à donner dans le séquençement des tâches doit être appris par la pratique pour obtenir des performances optimales.

Dans l'exécution de tâches n'ayant pas de priorité claire les unes par rapport aux autres l'avantage est à l'opérateur ayant une stratégie privilégiant celles les plus pénalisantes, devant celui qui utilise une tactique intuitive.

- Usage :

On l'utilise dans les estimations nécessaires de discrimination des tâches rapides simultanées.

* L'intuition.

- Résumé :

Concept rattaché au diagnostic (Lebraty, 2007).

Modèle de la première reconnaissance : face à une situation un expert la compare instinctivement à ce qu'il a vécu ou appris. Il va se référer à la solution prise précédemment, vérifiera qu'elle peut s'appliquer, simulera mentalement l'application au cas présent. Si elle convient il la met en œuvre sans comparaison à d'autres options.

Si elle ne convient pas il imaginera une autre avec une nouvelle simulation mentale, toujours sans comparaison d'options.

Grande conséquence : ce processus nécessite une bonne conscience de situation, avec atteinte de 3 niveaux :

- perception des éléments de l'environnement, temps et espace,
- compréhension de leur signification,
- anticipation de leur évolution future.

Dans l'approche naturaliste (*G Klein*) l'intuition constitue le mécanisme central de tout processus de prise de décision complexe.

« situation => génère => indices => permettent de reconnaître => modèles => activent => modes d'actions => ayant une incidence sur => situation =>....».

Intuition, mécanisme cognitif mis en œuvre par :

- les modèles mentaux (*PN Johnson-Laird*), représentations simplifiées de situation perçue, variables selon tâche à gérer,
- l'expérience, ayant internalisé le triplet situation- actions-effets,
- les émotions, en situation d'urgence et de risque, influant sur capacités cognitives de reconnaissance et de simulation,
- les croyances influant sur les modes d'action envisagés.

Mécanisme quasi-instantané de croisement d'une perception avec une expérience passée pour un expert.

Attitudes à adopter pour améliorer le recours à l'intuition (*Klein, 1999*)

- la première solution que l'on envisage est souvent la meilleure, d'ailleurs on y revient souvent,
- veiller à toujours comprendre la situation,
- ne pas confondre ses désirs avec ses intuitions.

La peur de l'erreur peut avoir un rôle néfaste sur le recours à l'intuition.

- Usage :

L'intuition joue dans tous les cas traités, mais le plus souvent de façon négative car basée sur de fausses perceptions mentales, sans avoir le temps de les corriger.

* [Les conflits, la persévération, l'effet tunnel](#) (« tunneling »).

- Résumé :

- Tiré de la thèse de *Frédéric Dehais* (*Dehais, 2004*) :

Tendance naturelle, erreur de fixation (*Keyser, Woods*), erreur diabolique (*Wanner*), syndrome de persévération (neurologie *Levine*), fascination pour l'objectif (*BEA*) : 4,5% des accidents, 41,5% des décès.

Théorie de l'engagement social et de la soumission (*Festinger, Beauvois, Joule*), escalade de l'engagement.

Bases cognitives de la persévération : aspect dynamique des situations et difficultés de recalage cognitif. Ressources limitées (*Broadbent, Amalberti, Spérando*) et oubli de la globalité. Gestion inadaptée des mécanismes attentionnels (*Keyser, Woods*). Existence de précurseurs favorisant l'erreur.

Bases neurologiques de la persévération : modèles en psychologie cognitive relevant de la métaphore (*Camus*). Explication neuropsychologique par description des structures neurales sous-tendant les fonctions cognitives attention, mémoire, actions par anticipation, contrôle, etc.

Persévération et théorie de l'inhibition : Décider revient à inhiber les stratégies non adaptées (*Houdé, Berthoz*). La persévération serait un trouble de l'inhibition (*Berthoz, Eustache, Faure, Gil*).

Conflit et persévération :

- le stress, syndrome général d'adaptation (*Selye*),
- le sentiment de perte, par concession, par soumission. Sélection d'un but unique, volonté de conserver un but.

Solutions pour empêcher la persévération : Nécessité d'identifier clairement in situ les types d'erreurs de fixation : manque de connaissances, d'entraînement, IHM non adaptée, systèmes d'assistance.

Logiciel de détection des conflits opérationnels ?

- L'effet tunnel, ou la tunnellation, expression venant du concept de « tunneling » utilisé aux USA. Une définition est donnée par *C Wickens* (Wickens, 2005) pour l'effet tunnel de l'attention :

"We can offer a rough definition of attentional tunneling as the allocation of attention to a particular channel of information, diagnostic hypothesis or task goal, for a duration that is longer than optimal, given the expected cost of neglecting events on other channels, failing to consider other hypotheses, or failing to perform other tasks."

Le même auteur distingue deux sortes d'effet tunnel provoquées par le stress (Wickens, Gordon, Liu, 1998):

« *perceptual tunneling, cognitive tunneling* »

- Usage :

Ces concepts de conflit, de persévération, d'effet tunnel se retrouvent dans tous les cas traités. Cependant il semble que le terme de persévération soit adopté dans les cas pathologiques, donc dans la thèse nous prendrons celui d'effet tunnel. Ce phénomène, observé dans les 5 cas analysés, semble lié à celui de saturation de la mémoire court terme Mct, dont nous parlerons plus loin.

* [Le mécanisme du diagnostic](#) (médical).

- Résumé :

Tiré du livre d'*Eric Raufaste* (Raufaste, 2001) :

Diagnostic médical : activité complexe finalisée par décisions visant des objectifs multiples, d'où modèle mathématique illusoire.

Une « analyse rationnelle pour les situations de travail » est possible si elle est basée sur le repérage de valeurs de rationalité. 3 dimensions de l'activité cognitive prises comme valeurs de rationalité, utilisables en interaction :

- la richesse en quantité de connaissances et de savoir-faire, limitée par propriétés du système cognitif
- la pertinence à propos de la sélection des connaissances et savoir-faire mobilisés

- la flexibilité rendue nécessaire lorsqu'un cas n'est pas résolu par les automatismes des 2 précédentes. C'est la remise en question des résultats des processus automatiques.
Hypothèse : la performance est modifiée par l'expérience sur ces 3 valeurs.

Un complément à ces travaux est donné par une étude sur la gestion des erreurs et des risques dans l'aide médicale urgente (Van Daele & Ait Armeur, 2010), où le diagnostic d'une situation doit être très rapide pour envoyer l'aide appropriée à une situation médicale vitale. Les arbitrages s'effectuent entre un objectif de sécurité et un objectif d'économie dans la mise en œuvre des moyens, la sécurité étant favorisée malgré des erreurs et des violations de règles (ou grâce à elles...). On ne pense pas que le renforcement des règles et des procédures diminuerait les risques, au contraire. En revanche des aides permettant aux opérateurs de rester dans des « marges » correctes seraient une solution.

- Usage :

S'agissant du diagnostic du médecin, celui du chirurgien ou de l'anesthésiste en opération serait plus approprié à la thèse. En revanche les problèmes de l'aide médicale urgente se rapprochent de ceux analysés dans la thèse par leurs caractéristiques de décision urgente. Le diagnostic fait partie essentielle du processus cognitif opérationnel, et les travaux cités sont utilisables pour la thèse avec quelques précautions à cause des délais très brefs imposés aux pilotes.

*** L'expertise**

- Résumé :

Tiré d'un article de I Pastorelli (Pastorelli, 2010):

« Deux perspectives peuvent être dégagées : la première, que l'on peut qualifier de position "human factors" postule que la performance est inversement proportionnelle aux erreurs de raisonnements. Elle se focalise sur les individus et constate que leurs performances sont limitées par de nombreux éléments dont les principaux sont les erreurs de raisonnement. Dans certains cas, cette approche remet en cause la notion même d'expertise dans son acception la plus répandue : celle d'une aptitude à développer de meilleurs raisonnements, en arguant que les experts se trompent autant que les non experts. La seconde perspective met au contraire en évidence les capacités des experts à obtenir un niveau de performance que d'autres professionnels ne pourraient durablement atteindre. Elle ne conteste pas le fait que les experts fassent effectivement de nombreuses erreurs, mais elle dépasse cette question en considérant que l'enjeu de la performance n'est pas, en définitive, lié à celui de la maîtrise des erreurs. L'expert n'est pas un individu qui sait mieux que les autres, mais qui fait mieux que les autres. Cette seconde approche de l'expertise constate que les individus les plus performants ne sont pas ceux qui commettent le moins d'erreurs, mais ceux qui savent les intégrer dans leur activité. Elle considère que l'erreur peut même jouer un rôle positif et qu'elle ne devrait pas être complètement supprimée par les systèmes d'aide à la décision. »

Ainsi le terme d'expertise est ambigu : il peut faire référence à une compétence supérieure ou reconnue comme telle (expertise juridique, médicale, systèmes experts) ou à une qualification par rapport à une tâche. C'est ce second sens qui est utilisé dans le monde du

travail et en ergonomie. De ce point de vue, la qualification est une reconnaissance sociale qui a une valeur marchande (en termes de salaire, de statut professionnel).

L'expertise est une automatisation construite par des représentations d'un problème plus riches que celles d'un novice (Raufaste, 2001). Les experts mobilisent plus de savoirs et de savoir-faire. Leurs représentations sont plus pertinentes. Ils sont plus flexibles.

Les pilotes d'essais peuvent être considérés comme des super-experts pour leur rapidité d'analyse de situation grâce à leur expertise. Ils ne sont pas les seuls à pouvoir être considérés comme tels dans la profession de pilote, avec par exemple certains pilotes instructeurs et/ou examinateurs en vol.

Une étude menée avec des experts et des super-experts dans des compétitions d'échec (Bilalic, McLeod, & Gobet, 2007) montre des résultats intéressants, en particulier dans la corrélation entre expertise et adaptabilité (flexibility). De façon non ambiguë elle montre que, soumis à des choix de solutions soit connues mais lentes ou soit inédites mais rapides, les experts choisissaient plutôt les premières et les super-experts plutôt les secondes. Ce résultat conforte l'hypothèse que l'expertise « simple » mène à un manque de souplesse en choisissant des solutions connues alors que la grande expertise tient compte du moindre détail offert pour choisir la solution la mieux adaptée à la situation, donc est souple dans ses choix en vue de la meilleure performance.

- Usage :

L'expertise est amplement utilisée dans cette thèse, les analyses étant basées sur son utilisation.

Tous les pilotes dont les comportements sont analysés dans la thèse sont donc des experts dans leur profession. Cependant le terme « d'expert » n'est utilisé dans la thèse que pour les personnalités ayant supervisé les analyses, pouvant être ainsi qualifiées dans le Chapitre 6 de « super-experts ».

*** Les erreurs, la défaillance, la gestion des risques**

- Résumé :

La gestion des risques est liée à celle des erreurs et des défaillances. Un document résume assez bien l'ensemble des problèmes qui y sont liés (Chauvin, 2003), privilégiant une approche systémique du risque, en particulier la comparaison entre les exigences de la tâche à exécuter et les ressources cognitives du moment.

Les travaux des dix dernières années ont attiré l'attention sur deux résultats, dans le domaine de la sécurité des systèmes:

- ☐ L'erreur n'est pas un échec, c'est un aspect consubstantiel de l'activité humaine. Elle est le reflet des stratégies mises en place par l'intelligence, qui dans un souci de performance (réduction de la complexité, anticipation) comporte une prise de risque. Mais ce risque est assumé, et même utilisé dans les stratégies d'adaptation et de récupération. Ce qui émerge de cette approche, c'est aussi la distinction entre l'erreur et ses conséquences.
- ☐ Un accident n'est pas le seul résultat d'une erreur. C'est le résultat d'un enchaînement de causes, qui fait que l'erreur n'est pas détectée, ou trop tard, ou que sa gravité est mal évaluée. L'accident est le révélateur d'une faiblesse des « défenses » du système,

puisque'il faut considérer que les erreurs, en elles-mêmes, font partie de son fonctionnement normal (Reason, 1987). Un système bien conçu possède des défenses « en profondeur » contre les conséquences des erreurs qui surviennent inévitablement.

On s'intéresse plus, dans cette approche, au système et à ses défenses qu'à l'opérateur individuel et à ses erreurs, ou alors à la compréhension du fait qu'une erreur dégénère en accident par la faiblesse du système. Suite aux travaux de *Alwood* et de *Rizzo* (Dehais, 2004), la notion de détection et de récupération des erreurs devient plus importante que l'évitement des erreurs, qui était la notion centrale de l'approche fiabiliste, et qui n'est plus un objectif en soi.

De nombreuses publications ont répertorié les types et les causes des erreurs opérationnelles. Les mieux référencées sont celles de *P.Lecomte et J.C.Wanner* (Lecomte & Wanner, 2004).

- Usage :

Les erreurs sont la cause des incidents et accidents analysés. Leurs causes cognitives font partie intégrante des analyses, et serviront de base aux recommandations de cette thèse.

Le cas n°4 analysé concerne le cas particulier de l'effacement d'une manœuvre sur la mémoire de travail MT (Baars, 1992).

La gestion des risques dans cette thèse peut se résumer en la recherche immédiate de se sortir d'une situation dangereuse.

*** La résilience.**

- Résumé :

Nouveau concept remplaçant ceux d'adaptabilité et de retour aux performances d'avant une perturbation. Plutôt que chercher la cause d'erreurs, anticiper les problèmes et s'y préparer (Hollnagel, Woods, & Levenson, 2006).

La résilience nécessite de l'expertise et des organisations souples, et qui apprennent (Deharvengt, 2007)

- Usage :

Le phénomène de focalisation de l'attention endommage la faculté de résilience.

Ainsi que nous le verrons plus tard (Chapitre 7.4) pour les résultats de cette thèse la notion de résilience se résume principalement en la capacité du pilote à maîtriser ses réactions.

Le problème de l'équilibre entre les procédures rigoureuses et l'adaptation à l'imprévu est posé ici.

« *Les cas dangereux les plus fréquents et causant le plus de soucis pour leur potentialité accidentogène sont ceux de mauvais choix dans les manœuvres et procédures à adopter lorsque l'action requise dans une situation de stress ou de temps limité exige de sortir de la procédure apprise mais inapplicable dans la situation présente* » (Lelaie, 2009). La question ainsi posée par *Claude Lelaie* est un vrai problème confirmé par les résultats de la thèse.

3.3.4 - L'élément primordial dans toute action

*** Le temps.**

- Résumé :

Il est reconnu que le temps utilisé par le cerveau est différent du temps physique par sa référence de durée évoluant suivant les circonstances et l'état physiologique et psychologique de l'individu (Ivry, Schlerf, 2008).

Les actions cérébrales sont bien fonction du temps mais l'horloge interne n'est pas définie même si elle fonctionne, ou si elle existe en tant que telle (Pouthas & Macar, 2005). Hypothèse basée sur la physique: il y a probablement de nombreuses « horloges internes » liées à des réseaux neuroniques particuliers pouvant se combiner et s'associer comme cela se produit dans la combinaison physique des vibrations où apparaissent des fréquences combinatoires plus ou moins apparentes suivant les associations d'amplitudes, de fréquences et de phases des oscillations élémentaires, donnant l'impression d'une incohérence de référence de base, ou au contraire faisant apparaître des phénomènes de résonance (Buhusi & Meck, 2005).

- Usage :

C'est la base principale de la thèse. Dans les analyses on utilise uniquement le temps physique, le temps réel, le seul pouvant rationnellement relier les comportements observés aux phénomènes physiques observés. On y établit une corrélation admissible entre les deux concepts de temps, sans préjuger de la complexité des horloges internes du cerveau.

Ce point est amplement traité dans les chapitres suivants.

3.4 - HYPOTHESES ET CHAMP D'APPLICATION

3.4.1 - L'utilisation des concepts choisis

Le sujet de la thèse est l'étude de cas de pilotage dans des situations soudaines, inattendues, rapides, dangereuses, c'est-à-dire mettant en jeu des actions de durée de l'ordre de la seconde à la minute. Or les concepts listés ci-dessus dans la catégorie « concernant les mécanismes cognitifs » ont été établis pour des durées souvent largement supérieures à la minute, et ceux de la catégorie « concernant la manifestation de ces mécanismes cognitifs » se réfèrent tous à des études de situations dépassant aussi largement la minute. Cela signifie que de nombreux concepts mentionnés devront être utilisés avec prudence en les extrapolant à des durées très courtes. Cela nécessitera parfois de simplifier leur application pour les adapter aux situations réelles analysées.

Avant d'aller plus loin il est nécessaire d'explicitier ce qu'on entend par « action cognitive » dans cette thèse. Pour les comportements analysés des pilotes il s'agit aussi bien des comportements conscients que des comportements inconscients (mentalement automatiques), qu'ils soient ou non qualifiés de « réflexes ». Ils sont tous extraits ou dérivés de la mise en mémoire d'actions potentiellement possibles par éducation, formation ou expérience vécue.

3.4.2 - De quel pilote s'agit-il ? Les paramètres humains

Ce point était certainement l'un des plus délicats de la thèse. Chaque individu est un être particulier. Comme l'indique l'un des experts consultés : « *L'expérience m'a montré qu'il n'y a pas d'homogénéité, sinon dans la performance obtenue le jour des tests ; le comportement des individus dans les moments intenses est très varié, souvent déroutant, voire inexplicable* ». Pour aller dans son sens les cas analysés dans la thèse d'accidents et d'incidents montrent bien cette diversité.

Cependant l'observation citée d'une certaine homogénéité dans le comportement lors de la situation stressante des tests est intéressante car, bien que de façon involontaire, elle autorise l'idée importante d'une possible homogénéité dans d'autres situations stressantes, ce qui est le cas dans cette thèse.

Mais aussi la population mondiale des pilotes professionnels, militaires et civils, subit des sélections (médicales, physiologiques, techniques, voire psychologiques), des éducations de base et des formations répondant à des critères planchers admis mondialement. Pour l'aviation de transport l'ordre de grandeur de cette population active est d'environ 500.000 pilotes, ce qui est relativement peu. Il y a évidemment des différences culturelles, des niveaux différents d'expérience, mais on constate une certaine homogénéité de base, sanctionnée d'ailleurs par des licences professionnelles et des qualifications de types équivalentes. Et l'objet de la thèse est d'essayer de découvrir d'éventuels communs dénominateurs de leurs comportements, certes dans d'étroites limites de validité, mais sans a priori sur l'impossibilité de la découverte.

Nous sommes intéressés par le comportement opérationnel pendant quelques secondes. Un tel comportement présente des aspects opérationnels et des aspects affectifs. Nous faisons

l'hypothèse que la nature même des situations étudiées relègue au second plan les paramètres affectifs pendant la courte durée en jeu, alors que l'attention totale est dévolue à la recherche de solution immédiate. Nous négligeons donc l'influence peu probable des paramètres affectifs après avoir vérifié qu'ils ne présentaient aucune occurrence déterminante avant l'évènement clé.

Enfin et surtout la façon logique, fine et détaillée du type d'analyse adopté, s'intéressant uniquement aux mécanismes cognitifs élémentaires, s'affranchit ainsi qu'on le verra de l'état affectif des acteurs. Cet état affectif est inclus comme résultat dans les mécanismes analysés. Il les influence sans qu'on ait besoin de les expliciter a priori.

3.4.3 - Le temps.

Les modèles cognitifs initialement recherchés présentent tous un aspect qu'on peut qualifier de « cinématique » : le temps n'y est pas explicité comme définissant un déroulement chronologique des actions cognitives. Seules les fonctions et leurs relations y sont montrées, souvent de façon très détaillée mais qui ne renseigne pas sur leurs assignations et leurs interférences en fonction du temps dans une situation réelle (Hoc, Mancini, & Woods, 1998). Un modèle sensé représenter des actions complexes de courte durée doit prendre en compte le temps comme variable clé afin d'exprimer cet aspect « dynamique » des actions cognitives.

Le modèle DSM (Dynamic Situation Management) de *R Amalberti et JM Hoc* (Hoc & Amalberti, 1999) est une amélioration du modèle de *J Rasmussen*, mais reste insuffisant pour décrire des actions de très courte durée. Nous n'avons pas trouvé dans d'autres domaines concernés par le très court terme, par exemple la conduite automobile (De Waard, Van der Hulst, Hoedemaeker, & Brookhuis, 1999) de processus exploitable.

Indépendamment de cette introduction du temps comme paramètre essentiel des analyses, l'autre problème à résoudre était le lien entre le temps physique régissant tout évènement et tout fonctionnement matériel, de l'avion en particulier, et le temps interne régi par le cerveau. Une solution a été trouvée, mentionnée plus loin.

3.4.4 - Limite de validité

Nous ne cherchons pas à valider la présente méthode en dehors de son champ d'application, c'est-à-dire pour des phénomènes se produisant dans une très courte période de temps de quelques secondes à une minute environ. Elle serait probablement applicable avec des compléments.

3.5 – ELABORATION DU MODELE

3.5.1 – Présentation et hypothèse de base

Sans vouloir réinventer ce qui l'est déjà nous adapterons au sujet de la thèse ce qui existe, en présentant un modèle permettant une analyse fonctionnellement et dynamiquement correcte.

Nous associons **le modèle de Jens Rasmussen** (Rasmussen, 1986 ; Rasmussen, Leplat, & Brehmer, 1991) modifié d'après les observations en séances de formation des équipages de Concorde et d'Airbus, à **l'organisation des tâches cognitives de Guy Boy** (Boy, 1998) adaptée au pilotage à court terme, avec comme « briques » communes à l'ensemble **les modèles mentaux de Jean-Claude Wanner et de Pierre Lecomte** (Lecomte & Wanner, 2004). La combinaison adaptée des trois concepts traduit l'aspect « système » du fonctionnement cérébral, certes de façon simplifiée mais suffisamment claire et complète pour représenter et comprendre les phénomènes élémentaires en jeu.

Mais dans les limites de durée des hypothèses de la thèse, ce système ne peut fonctionner de façon dynamique qu'à l'aide du support associant le présent fugitif à une rémanence nécessaire, **la mémoire court terme**, parfois la mémoire de travail.

Avant d'entrer dans le détail du modèle choisi et de ses éléments il est nécessaire d'explicitier les hypothèses adoptées.

- Nous traitons de façon indifférenciée les modèles mentaux « statiques », tels que des images ou des connaissances sémantiques, et « cinématiques », tels que des procédures ou des gestes et leurs dosages, placés en mémoire long terme. Ce sont les informations opérationnelles mémorisées, « inanimées ».

- En revanche nous faisons l'hypothèse que leur utilisation opérationnelle est « intelligente », c'est-à-dire qu'elle est occasionnée et gérée par un processus cognitif, conscient ou non, fonction des perceptions et des objectifs du moment. Nous traitons ce processus dynamique, fonction du temps, indépendamment des modèles mentaux : ce sont les fonctions cognitives, qui d'ailleurs utilisent les modèles mentaux comme base « qualitative et quantitative » pour leur fonctionnement temporel. **Nous supposons donc que les fonctions cognitives ont une structure différente de celle des modèles mentaux, qu'elles sont à l'origine du « mouvement cognitif dynamique ».**

- Puis nous différencions les actions conscientes des actions mentales inconscientes ou automatiques. Toutes sont gérées par des fonctions cognitives, mais les conscientes le sont grâce à un processeur et à des agents conscients ainsi que nous l'indiquons ci-après.

3.5.2 - Modèles mentaux

Que sont-ils ?

Les modèles mentaux sont les éléments cadres de l'édifice opérationnel du pilote et il semble nécessaire d'y consacrer un Chapitre particulier. Ils sont des *schémas-cadres* bâtis et mémorisés dans les mémoires long terme **Mlt**, d'après l'éducation, la formation et

l'expérience. L'expérience du pilote fait qu'ils s'assemblent suivant leur utilisation en méta-modèles mentaux, en réseaux de modèles mentaux, **MMP** (Mental model patterns), permettant ainsi une extraction rapide de l'ensemble des bases requises pour qu'une fonction cognitive **FC** donnée puisse fonctionner, tout en regroupant l'ensemble connaissances, habiletés et procédures.

En fait les modèles mentaux MM en question sont en quelque sorte les matériaux cognitifs, les « briques », permettant la construction des actions menées par les fonctions cognitives ainsi qu'on le verra plus loin.

Leur structure semble être celle d'un cadre schématique n'étant pas figé. Dans les cas traités dans la thèse, pour le pilotage manuel en particulier, cette structure est souvent basée sur l'application d'équations de la mécanique du vol. Elle s'adapte au cas traité, à la fois aux perceptions détectées et perçues et à l'objectif défini.

Il faut noter que l'exploitation des sensations en vue de leur traitement mental par le cerveau utilise aussi des modèles mentaux souvent très élaborés (Lecomte & Wanner, 2004). Dans nos développements nous privilégierons surtout les processus en aval de ce traitement, sans sous-estimer son importance. Cependant ils revêtiront toute leur importance lorsqu'il s'agira de perception des situations.

L'extraction des modèles mentaux des mémoires long terme **Mlt** est effectuée « à la demande » par les fonctions cognitives **FC** des agents spécifiques **AG** ou directement par les agents principaux **AP** d'un processeur opérationnel **PO**, ainsi qu'on le verra ci-après.

Cette extraction est soumise à des conditions parfois surprenantes lorsqu'elle est associée de perceptions fausses ou partielles, et/ou de fortes attentes.

Nous verrons que dans les cas traités le nombre de modèles mentaux MM utilisés n'est pas considérable même s'il est notable. Pour le pilotage où les perceptions visuelles sont prépondérantes, ces modèles MM sont fréquemment des images mentales.

Pour définir les modèles mentaux MM nous nous baserons sur un grand nombre de notions établies expérimentalement dans les faits et acceptées par la communauté mondiale des pilotes, qu'il ne s'agit plus de démontrer, et sur des hypothèses bâties grâce à des observations personnelles.

Quels sont-ils ?

Nous parlerons surtout du pilotage manuel à court et moyen termes, sans pilote automatique (AP, Auto-Pilot) mais éventuellement avec directeur de vol (FD, Flight Director).

Dans notre cas les modèles mentaux MM étudiés concernent le pilotage coordonné dans les 6 systèmes décrits dans le Chapitre 2.2 précédent. Les objectifs majeurs sont la maîtrise de la trajectoire et de l'intégrité de l'avion (respect des limitations et évitement des obstacles).

Plus précisément ils concernent simultanément les systèmes 1 (contrôle du comportement aérodynamique de l'avion) et 2 (contrôle de la propulsion) afin d'insérer la trajectoire de l'avion dans les systèmes 3 (déplacement dans l'environnement atmosphérique) et 4 (déplacement dans l'environnement géographique) suivant les cas. A la limite on pourrait

fusionner les systèmes 1 et 2, mais leurs caractéristiques physiques sont trop importantes pour cela (les planeurs n'ont pas de système 2, parfois même l'avion comme dans l'accident A320 de janvier 2009 au décollage de N-Y La-Guardia avec perte totale de la propulsion).

Ils sont souvent ici l'interprétation psychologique des équations de la mécanique du vol dans le cas concret du pilotage. Ce qui n'est ni simple ni intuitif car un vol est la succession de phases et de sous-phases se déroulant de façon continue dans des contextes et environnements très variables, donc de situations évolutives où cependant cette mécanique du vol s'applique strictement et sans état d'âme. Et donc de façon continue et permanente le pilote doit se comporter pour en respecter les règles intangibles. Pour cela il utilise tout ce qu'il a stocké dans ses mémoires long terme **Mlt** et de travail **MT**, en temps et en séquences voulues.

Comment ont-ils été construits ?

Ils ont été établis grâce à des habiletés et des procédures enseignées au cours de la formation de base, confortées et complétées par l'expérience et les formations complémentaires, par exemple la qualification sur un type d'avion donné. Ils sont entretenus périodiquement par une formation de recyclage et de maintien (Recurrent Training), car l'évaporation plus ou moins rapide des éléments placés en mémoire est permanente. Une préoccupation majeure des formateurs est le temps de rétention chez leurs stagiaires des connaissances, procédures et habiletés enseignées.

Les perceptions en jeu sont surtout (1) **visuelles**, (2) **auditives** dans le travail en équipage et avec le contrôle au sol de la navigation aérienne (ATC, Air Traffic Control) ou pour les alarmes sonores, (3) **tactiles**, (4) **de rotation et d'inertie**, perceptions corporelles non fiables, causées par les mouvements de l'avion dont le pilotage aux instruments fait volontairement abstraction.

Les phénomènes extérieurs sont captés par les sens et reçus par le cerveau au travers de « filtres » les transformant en perceptions (Lecomte & Wanner, 2004). Ces intermédiaires sont de véritables modèles mentaux. Ces perceptions sont les **entrées** du système cognitif.

Les **sorties** que sont les actions tactiles, sont « manuelles » sur les commandes de vol, avec les mains sur le manche, les manettes des gaz et les différentes commandes d'équipements, et les pieds sur le palonnier et les freins. C'est surtout la coordination perceptions visuelles / actions manuelles en boucle fermée qui est enseignée, apprise et stockée en mémoire, disons de façon cinématique.

La mécanique du vol, bien qu'enseignée théoriquement en tant que connaissances, est ainsi apprise de façon concrète pas à pas par la pratique en vol réel et au simulateur de vol. La pratique est le fixateur mnésique des connaissances et des procédures. Elle enseigne et fixe les habiletés de façon descriptive et cinématique.

Les dosages (habiletés), les coordinations gestuelles et visuelles, sont appris : par exemple dans la stabilisation d'une altitude en fin de montée on diminue l'assiette longitudinale Θ et la vitesse verticale V_z en même temps que la poussée des moteurs pour que la vitesse V_C

reste constante, avec un dosage d'évolution pour que les passagers n'en soient pas gênés. L'ensemble de ces cas appris, habiletés et procédures, constitue des réseaux de modèles mentaux spécifiques, des « méga-modèles mentaux » dont le pilote tire les éléments pertinents « à la demande » lors d'une évolution donnée. Ce sont des assemblages de modèles mentaux MM élémentaires, des MMP (Mental model Patterns). Dans ce qui suit on appellera modèle mental **MM** indifféremment les modèles mentaux élémentaires, les méga-modèles et les images mentales.

De plus, au-dessus de cet ensemble essentiellement pratique, à base d'habiletés et de procédures (niveaux S « skills » et R « rules » de Rasmussen), existe une autre dimension mémorisée : celle de la connaissance synthétisant le tout, permettant de faire face aux situations dont la perception ne déclenche aucune mémorisation de modèles MM pertinents, en construisant un nouveau MM adapté. Mais alors que les MM habiletés et procédures sont assimilés d'après des modèles bien établis par les programmes de formation, cette connaissance synthétique est essentiellement personnelle, car son enseignement en formation de base n'est que rarement repris plus tard. Elle est complétée, voire modifiée par l'expérience personnelle. Cette dimension mémorisée faisant partie du niveau K « knowledge » de Rasmussen, fait parfois cruellement défaut à certaines catégories de pilotes n'ayant pas reçu une éducation théorique suffisante lorsque les modèles MM d'habiletés et de procédures s'avèrent insuffisants pour résoudre un problème immédiat.

Comment sont-ils utilisés ?

On fait appel à eux dans toute activité mentale, dans l'exécution de toute tâche. A la demande consciente ils sont extraits automatiquement des mémoires long terme **MLt** et de travail **MT** par les agents et leurs fonctions cognitives, en correspondance directe avec l'objectif d'une tâche et dans son contexte. Ce sont des ensembles symboliques (par exemple des images mentales d'instruments de bord) et/ou sémantiques (par exemple des relations logiques entre la vitesse et la poussée des moteurs) répondant et correspondant à la situation gérée par l'activité consciente du cerveau.

Ils permettent de lancer les actions pertinentes en fonction des perceptions qu'a le cerveau de la situation et de son évolution.

Ils autorisent aussi une simulation mentale de l'action lancée et de son résultat. Ceci est important et se retrouve de façon générale dans l'avance de phase, le « think ahead » du pilotage, l'anticipation des actions à effectuer. Ce phénomène est particulièrement présent dans la répétition mentale d'une voltige aérienne ou dans le briefing avant décollage. Dans ces deux situations on place une empreinte sur la mémoire de travail MT.

Mais ils peuvent aussi être utilisés de façon inconsciente dans deux cas par des agents (définis en 4.5.4) ainsi qu'on le verra plus loin:

- dans la perception inconsciente d'une anomalie ou d'une ambiguïté,
- de façon mentale automatique, soit autonome, ou soit déléguée lors de la simultanéité de plusieurs tâches dans la partie du séquençement où une tâche interrompue n'est plus temporairement régie de façon consciente et continue sur sa lancée.

Enfin il peut arriver qu'aucun modèle mental MM pertinent ne se trouve disponible dans une situation inédite. Dans ce cas le cerveau construit un support, un nouveau modèle MM répondant au besoin, qui souvent sera ensuite stocké en mémoire long terme Mlt et fera partie de l'expérience. La encore il s'agit du recours au niveau K « knowledge » déjà mentionné.

3.5.3 – Les mémoires à court terme et de travail

Il ne s'agit évidemment pas ici d'entrer dans des considérations philosophiques sur le présent, le passé et le futur et sur l'écoulement du temps. En revanche dès qu'on essaie d'analyser et d'expliquer des actions fonctions du temps, d'appliquer une dynamique aux actions quelles qu'elles soient, on est obligé de regarder comment elles s'articulent et se combinent en fonction de ce temps.

Nous constatons que cela n'est possible que lorsqu'on tient compte des traces temporelles laissées sur la mémoire par les actions qui de façon permanente, d'une manière continue ou séquentielle, passent du fugitif et insaisissable présent au passé mémorisé.

Pour cette thèse la mémoire en question est la mémoire court terme Mct qui, avec ses limitations temporelles (prises ici de 10 à 20 secondes), d'une part garde les traces des actions effectuées, et d'autre part garde la mémoire des actions à effectuer à court terme. Son rôle et ses limitations sont essentiels dans les actions cognitives de faible durée.

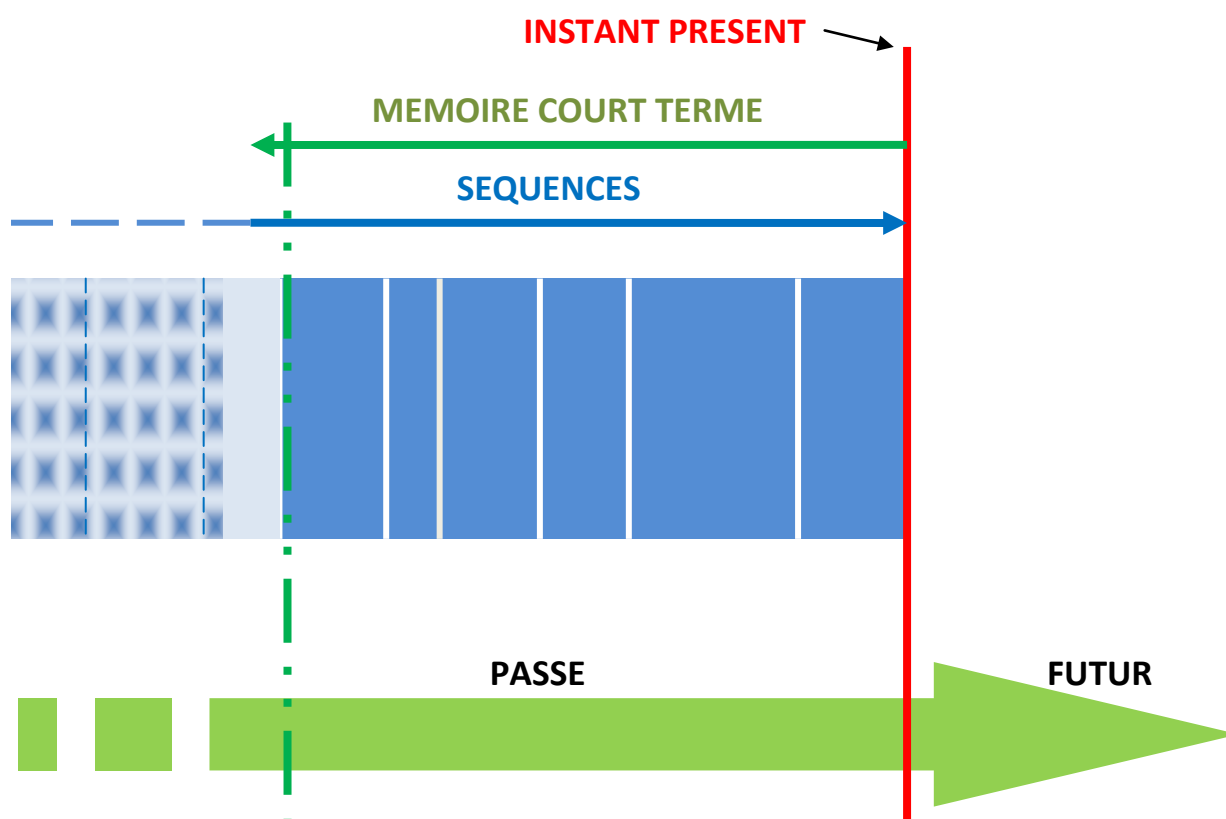


Figure 6 : Mémoire court terme

Toujours dans le cadre de la thèse la mémoire de travail MT, à laquelle se rattache peut-être la mémoire court terme, est surtout utilisée pour rappeler les séquences d'actions programmées dans une phase de vol prévue et attendue (Chapitre 5, Annexe 2, cas n°4).

3.5.4 – Mécanismes de base

Présentation

Le pilotage manuel est un assemblage appris, complexe et coordonné *de perceptions*, le plus souvent visuelles, et *d'habiletés manuelles*.

Les perceptions visuelles, dans notre cas la lecture des instruments de bord dans le pilotage court terme (principalement du PFD, Primary Flight Display pour les avions de dernière génération), servent simultanément à deux objectifs :

- (1) contrôler en boucle fermée le résultat d'une exploitation antérieure pour recalculer l'action présente,
- (2) choisir les informations pertinentes et les exploiter en vue d'une action future à partir du présent.

Ceci permet de concentrer dans un temps très bref les décisions des actes élémentaires, le contrôle de leurs résultats et l'application des corrections nécessaires. Le désavantage est que tout passe par un canal unique, la vision, au risque fréquent de saturer les fonctions conscientes correspondantes ou de négliger les informations nécessaires au maintien des actions automatiques autonomes inconscientes (par exemple la nécessaire vision périphérique pour le vol à vue).

Le recueil des informations visuelles s'effectue grâce à un balayage visuel du tableau de bord et de toute autre partie du cockpit, y compris les pare-brises et fenêtres donnant sur l'extérieur. Ce balayage est enseigné en école de pilotage pour qu'il soit systématique en « site et azimut » afin de ne rien oublier d'essentiel. En pratique il est très opportuniste vis-à-vis des tâches à effectuer, certains paramètres étant à un moment donné plus nécessaires que d'autres, qui plus tard le deviendront à leur tour. Il inclut la vision périphérique.

Les actions de commande sur le manche, le palonnier, les manettes de poussée, les sélecteurs divers sont éduquées pour que les mouvements induits, l'état des systèmes et la trajectoire de l'avion correspondent bien aux objectifs, qualitativement et quantitativement, le résultat étant jugé principalement au travers des informations visuelles. En fait ce qui est éduqué est une boucle d'asservissement particulière du dosage inconscient du toucher en fonction des résultats escomptés.

Comment tout cela s'articule-t-il cognitivement ?

Actions conscientes

D'après *Rasmussen* les actions conscientes sont générées en séquence par un « processeur séquentiel PS ». D'après de nombreuses observations opérationnelles ce séquençement ne peut s'effectuer qu'avec le support de la mémoire de travail MT, qui comporte surtout la mémoire court terme Mct essentiellement volatile.

Dans cette thèse, par hypothèse fondée sur l'observation personnelle des comportements opérationnels, nous associons donc le processeur séquentiel PS et la mémoire court terme Mct en appelant l'ensemble « processeur opérationnel PO ». Ce dernier, élément fictif représentant le fonctionnement cognitif opérationnel majeur, est donc lié à toute action consciente. La conduite des analyses des cas choisis d'incidents et d'accidents confirme le bien fondé de cette hypothèse.

Dans le cadre plus large de la mémoire de travail MT, intervenant dans l'évolution dynamique d'une situation, un rappel mnémonique peut intervenir au-delà de la durée de cette situation, mais pour des informations ponctuelles (contrastées ou perçues importantes pour la mission ou la phase de vol) mises de côté consciemment ou inconsciemment au cours du vol. Dans les cas de faible durée traités ici on fera surtout appel à la mémoire court terme Mct, liée à la situation immédiate.

En dehors de leur structure séquentielle, une caractéristique des actions conscientes est qu'elles fonctionnent en boucle fermée d'asservissement BF, c'est-à-dire qu'elles se recalent en permanence sur leurs résultats observés.

Quelques caractéristiques des actions conscientes :

- les actions conscientes se succèdent en série,
- elles sont initiées d'après des objectifs,
- les perceptions traitées de façon consciente le sont par une sorte de « processeur cognitif », le processeur opérationnel PO,
- ce traitement fait appel à des informations stockées dans les mémoires à long terme Mlt (mémoire sémantique et mémoire procédurale) ou de travail MT.

Pour les cas opérationnels choisis, le traitement des informations est sectorisé en fonction de catégories de tâches spécifiques définies et apprises professionnellement, et gérées par le processeur conscient PO, en conformité avec les objectifs définis ou avec les tâches assignées (qui sont aussi des objectifs), : par exemple le pilotage manuel, l'utilisation des systèmes automatiques, la surveillance de l'environnement extérieur, le trafic radio, etc. Ces catégories ont été enseignées aux pilotes au cours de leurs diverses formations : formation de base (éducation), qualifications de types (avions particuliers), stages de recyclage (maintien des connaissances et habiletés), travail en équipage (coopération), et expérience personnelle. Les pilotes ont ainsi acquis une sorte d'adaptation guidée et codifiée (parfois standardisée) à la conduite des avions.

Actions automatiques

L'utilisation du terme « automatique » par les psychologues pour désigner les actions inconscientes est un exemple de possible confusion par les pilotes et ingénieurs pour qui « automatique » est un attribut des systèmes matériels alors qu'« inconscient » est bien un attribut humain.

Les actions mentales automatiques ou inconscientes sont générées :

- soit par une « délégation » du processeur opérationnel PO ou de ses agents (AP et AG, voir plus loin),
- soit de façon autonome, par des modèles mentaux MM (ou des Mental Model Patterns MMP) activés directement par des perceptions physiques ou mentales, et tirés des mémoires long terme Mlt ou de travail MT.

Quelques caractéristiques des actions mentales automatiques :

Elles ont l'avantage de ne pas trop coûter de travail cognitif, car en première approximation elles n'utilisent pas les ressources cognitives limitées nécessaires aux actions conscientes, et ainsi ne participent pas aux éventuelles saturations causées par un travail mental trop important.

Elles s'effectuent en parallèle des actions conscientes.

Elles sont initiées principalement :

- par une fonction permanente de veille la plupart du temps inconsciente, décelant une nécessité de réaction mémorisée dans les diverses mémoires et l'appliquant, par exemple l'arrêt d'une alarme auditive gênante alors que l'attention se porte ailleurs ;
- par un agent fictif AG ayant lancé une fonction cognitive FC de façon consciente mais dont l'accomplissement conscient est interrompu pour laisser la place à une nouvelle séquence, comme dans l'interception manuelle d'une altitude où l'on gère et contrôle simultanément la vitesse, l'altitude, l'assiette longitudinale, la poussée ;
- par la prise en compte « machinale » d'une action déterminée par l'association d'un geste habituel à une situation habituelle, par exemple placer un document à un emplacement habituel après utilisation.
- par la prise en compte d'une situation définie dans les mémoires long terme Mlt ou de travail MT par une fonction cognitive FC mémorisée et correspondant à la résolution de la situation, par exemple l'équilibre de la conduite en vélo. Le « geste machinal habituel » évoqué appartient à ce genre.

Elles sont de deux types différents, déléguées ou autonomes.

- Dans le cas d'une action consciente temporairement interrompue, la fonction cognitive FC continue sur sa lancée, par exemple dans le séquençage rapide du pilotage utilisant le balayage visuel des différents paramètres assurant ainsi simultanément le pilotage de l'altitude et celui de la vitesse. Il arrive aussi qu'au sein d'une fonction cognitive FC donnée certaines actions puissent passer provisoirement en mode mental automatique si la FC doit prendre en compte d'autres actions de sa responsabilité en mode conscient. Nous qualifierons ce type

de fonction cognitive de **fonction mentale automatique déléguée** (déléguée temporairement par un agent ou par le processeur opérationnel).

Une caractéristique des actions mentales automatiques déléguées (le plus souvent en interruption temporaire d'une action consciente) par le processeur opérationnel PO ou par ses agents est leur fonctionnement en boucle ouverte d'asservissement BO donc divergent, mais recalé de temps en temps en boucle fermée BF par des perceptions conscientes parfois fugaces, par exemple un bref coup d'œil sur l'altimètre si l'altitude est le paramètre suivi automatiquement.. La brièveté de ces recalages pourrait les faire passer pour des automatismes autonomes ce qui expérimentalement n'est pas le cas.

- La prise en compte d'une situation définie dans les mémoires long terme Mlt ou de travail MT par une fonction cognitive FC mémorisée et correspondant à la résolution de la situation sera qualifiée de **fonction mentale automatique autonome**. Les fonctions mentales automatiques autonomes fonctionnent en boucle fermée sans passer par le processeur PO ou l'un de ses agents.

Cependant une saturation de la partie consciente, par exemple par focalisation visuelle de l'attention avec effet tunnel, peut inhiber des fonctions mentales automatiques autonomes utilisant les mêmes canaux de perception, par exemple celles fonctionnant grâce à la vision périphérique inhibée par la focalisation visuelle.

3.5.5 – Processeur opérationnel et agents

Fonctionnement de base

Les actions cognitives sont effectuées suivant des processus innés ou appris stockés dans les mémoires. Dans notre cas, de façon consciente elles sont activées par le processeur opérationnel PO. Si nous observons comment fonctionne cette **partie consciente** dans le cadre de la thèse nous pouvons constater deux grandes catégories de fonctions opérationnelles se partageant l'allocation temporelle de la mémoire court terme Mct, en partage de temps, alors que les actions automatiques inconscientes fonctionnent en dehors de cette obligation de partage :

- des fonctions de « gestion » non spécialisées et permanentes, qui sont dans notre cas la vigilance, l'interprétation des perceptions, le diagnostic, la distribution de rôles et de tâches, le contrôle des objectifs ;
- des fonctions opérationnelles spécialisées nécessitant de l'attention. Nous verrons (Chapitre 7) que le stress peut initier une ou des fonctions cognitives majeures régies directement par le processeur opérationnel PO, pouvant ensuite être déléguées à des agents AGn.

Ainsi en appliquant la théorie des agents nous pouvons attribuer ces fonctions à **des agents fictifs, correspondant à des réalités apprises de groupement et de gestion de fonctions opérationnelles**. En fait un agent est un assemblage de fonctions cognitives gérant des tâches complexes en vue d'accomplir une tâche opérationnelle majeure, par exemple le pilotage manuel, ou la navigation.

En préliminaire plusieurs remarques sont à faire sur la distribution d'attention en partage de temps :

- Elle nécessite, pour les fonctions de pilotage qui ne supportent aucune interruption temporelle, que certaines fonctions passent en mode mental automatique délégué pendant le temps où une autre fonction requiert une attention consciente, par exemple le traitement « simultané » de l'assiette longitudinale, celui de l'altitude et celui de la vitesse.
- Ce partage du temps s'effectue au droit des fonctions cognitives activées, c'est-à-dire au droit des agents les ayant activées et qui en supportent évidemment directement ce partage.
- Les fonctions cognitives peuvent donc avoir un fonctionnement mixte, successivement conscient ou automatique.
- Si une fonction cognitive FC requiert une attention soutenue, c'est-à-dire demandant une durée importante de l'allocation de temps sur la mémoire court terme Mct, elle peut arriver à saturer la partie consciente au détriment des autres.
- Dans le cas d'une charge d'attention importante nécessaire au fonctionnement d'une fonction cognitive FC, la capacité cognitive de diversification de l'ensemble, c'est-à-dire celle du processeur opérationnel PO supervisant l'agent donc sa FC, diminue sensiblement.
- Si deux tâches différentes utilisent chacune une modalité différente, vision et audition, l'interférence entre elles est minimale mais n'est pas nulle (cas de l'intervention verbale du copilote alors que le pilote est occupé dans une phase de pilotage difficile).

Dans notre analyse le nombre des agents AG et de leurs fonctions cognitives FC est limité et leurs fonctions sont bien définies. Leurs appellations et numérotations présentées ci-après sont arbitraires et ne servent que pour cette thèse.

Quelques caractéristiques du fonctionnement des agents :

- Chaque secteur spécifique de tâches est confié à un « agent » **AGn** donné pour qui l'accomplissement de la tâche est l'objectif spécifique élémentaire, par exemple le pilotage manuel, la navigation, la communication au sein de l'équipage, etc. Chacun des agents ainsi appelés traite un sujet défini d'après l'objectif assigné, au moyen des perceptions cherchées et retenues et des éléments mémorisés dont il a besoin. Pour cela il utilise des modules d'exécution de tâches élémentaires, des fonctions cognitives FC, utilisant des modèles mentaux MM. Elles servent de cadre et de support à la combinaison dynamique, c'est-à-dire temporelle, de ces modèles MM avec les perceptions cherchées et retenues pour transposer la tâche en action. Par exemple pour l'agent « pilotage manuel » ce dernier utiliserait les FC suivantes : traitement d'une interception et du maintien d'une vitesse, ou d'une altitude, ou d'une trajectoire d'approche, d'un cap, etc.
- Autre formulation : pour atteindre l'objectif particulier fixé par le processeur opérationnel **PO**, par exemple dans la réaction sous stress à une situation soudaine, ou pour une interception d'altitude, un agent **AG** accomplit des tâches (qui sont ainsi

des objectifs élémentaires) et pour cela il utilise des ressources mentales nécessaires pour déboucher sur des actions appropriées. Ainsi l'agent emploie des fonctions cognitives **FC** utilisant au mieux ce dont elles disposent : les modèles mentaux **MM** recherchés et trouvés dans les mémoires Mlt ou MT, et les perceptions retenues par le processeur PO ou son agent AG, perceptions qui seront ensuite directement prises en compte par la fonction cognitive FC pour sa tâche d'exécution.

Les fonctions FC transforment alors la tâche demandée en action, pas forcément identique à la demande du fait de l'imperfection des perceptions et de leur traitement, de la mauvaise ou insuffisante qualité des modèles mentaux ou de leur adaptation imparfaite, etc.

- Le traitement conscient se poursuit chronologiquement en « distribuant » les tâches alternativement aux agents requis, les parties conscientes de ces tâches se succédant en séquences temporelles à l'intérieur d'un segment de temps inextensible: la mémoire à court terme Mct. Si une séquence dépasse la limitation temporelle de cette mémoire les tâches qui étaient en suspens sont effacées et leur reprise devra être effectuée ultérieurement par le processeur PO pour initier à nouveau la séquence perdue, au prix d'une dépense de temps supplémentaire.

Fonctionnement du processeur opérationnel :

Lors du traitement d'une nouvelle situation, pour son diagnostic le processeur PO (ou l'agent AG dédié) retire des mémoires Mlt les modèles mentaux MM satisfaisant simultanément à 3 critères :

1. **le premier qui surgit en fonction des perceptions retenues**, en fait les perceptions retenues conformément aux attentes s'il y en a (pouvant être tronquées ou mal interprétées),
2. **conforme au contexte présent perçu**,
3. **adapté aux objectifs estimés de façon intuitive**.

Sinon la recherche se poursuit ou un nouveau modèle est construit pour s'adapter aux conditions présentes. Cependant le modèle retenu, spontanément ou pas, peut ne pas être adapté à la situation car il est forcément choisi d'après des perceptions qui pourraient être soit partielles et insuffisantes, soit mal interprétées.

Les traitements conscients sont menés en boucle fermée, avec contrôle du résultat et correction si l'objectif n'est pas atteint.

Fonctions non spécialisées ou permanentes des agents :

AP1 (Agent Principal 1) :

Il est la partie maîtresse du processeur opérationnel PO : interprétation des perceptions, diagnostic, gestion générale et distribution d'objectifs aux autres agents, contrôle des résultats. Cette fonction reste toujours « en attente » lorsque l'attention est passée à un agent opérationnel d'exécution.

AP2 (Agent Principal 2) :

Cette fonction est aussi permanente : vigilance, détection d'anomalie et d'ambiguïté, souvent en action mentale automatique. Elle consiste à déceler ce qui ne correspond pas à « l'image » des tâches décidées, ou ce qui introduit une perturbation immédiate ou potentielle dans le cours de leur exécution. Son action se traduit par la succession d'un « étonnement » d'amplitude variable suivant le contraste de la découverte sur les tâches en cours, et d'une prise en compte consciente par le PO. On peut citer comme comparaison à ce sujet « l'alarme immanquable » imposée par les autorités de certification lorsque survient une panne au cours d'une approche sans visibilité de type Catégorie III, alors que l'attention des pilotes est entièrement prise par la gestion précise de la trajectoire.

En fait il s'agit d'une surveillance du contexte, de l'environnement. Il semble que son intervention ne soit possible que lorsque la capacité mentale n'est pas entièrement prise par les tâches en cours. Sa prise en compte soudaine par le PO peut occasionner une focalisation saturant cette capacité.

Fonctions spécialisées des agents :

Leur choix arbitraire est adapté à l'étude présente.

AG1 (Agent opérationnel 1) : pilotage à court terme manuel, faisant appel à plusieurs fonctions cognitives FC dont le séquençement dépend de l'interprétation des perceptions soit par AP1, soit par l'AG1 directement, parfois en fonctionnement mental automatique. Il s'agit ici du contrôle de l'avion autour de son centre de gravité (cdg) et de celui à court terme de sa trajectoire.

AG2 (Agent opérationnel 2) : surveillance de l'espace extérieur.

AG3 (Agent opérationnel 3) : gestion et contrôle à moyen terme de la trajectoire, navigation.

AG4 (Agent opérationnel 4) : gestion du pilotage à moyen terme et de la navigation avec les systèmes automatiques.

AG5 (Agent opérationnel 5) : communication interne en équipage.

AG6 (Agent opérationnel 6) : communication avec l'extérieur, en particulier avec les contrôleurs au sol.

AG7 (Agent opérationnel 7) : gestion des systèmes de l'avion, autres que les fonctions automatiques de pilotage et de navigation.

Notez qu'en équipage à deux, pour le pilote en fonction (PF) le pilote non en fonction (PNF) doit être considéré comme un agent particulier « **PNF** ».

3.5.6- Fonctions cognitives

Ce sont les éléments dynamiques du modèle choisi. Leur fonctionnement est essentiellement temporel. Elles transforment les tâches déterminées et assignées, grâce à des objectifs définis par chaque agent AP ou AG ou par le processeur PO, en actions conscientes (en quelque sorte de façon analogue à celle des fonctions de transfert de la mécanique), par exemple la conduite d'une approche visuelle, avec les **entrées visuelles** de la vue sur la piste, complétées par les **entrées auditives** des annonces du radioaltimètre, et avec les **sorties manuelles** de mouvements sur le manche, actionnant les commandes de vol, et les leviers de poussée des moteurs.

Cependant des fonctions cognitives FC peuvent aussi accomplir directement des tâches de façon mentalement automatique, par exemple lors du pilotage simultané de la vitesse et de la trajectoire en virage où l'on passe de façon alternée de l'échelle de vitesse à l'horizon artificiel (délégées dans ce cas).

Dans les 2 cas, conscient et mentalement automatique, les fonctions cognitives FC utilisent les modèles mentaux MM et MMP pertinents aux tâches déterminées. Les actions ne sont pas forcément identiques aux tâches : elles en diffèrent par l'adaptation des MM et MMP ; par exemple l'exécution du pilotage d'une approche à vue, avec des perceptions utilisées différentes d'un aéroport à un autre et avec des conditions météorologiques variables, fréquemment non exactement conformes aux schémas mémorisés.

Les modèles mentaux MM étant des *schémas-cadres*, les fonctions cognitives FC leur impriment la dynamique nécessaire à l'action, en établissant la correspondance temporelle entre les perceptions tirées des informations visuelles et corporelles, et l'action visant à l'atteinte de l'objectif via les modèles mentaux MM qui deviennent alors les « équations » des fonctions cognitives FC. Pour ce faire, dans les cas analysés ici, une fonction cognitive FC choisira, probablement de façon probabiliste basée sur l'expérience, une action conforme aux valeurs des paramètres principaux demandés par le modèle mental MM choisi, et dosera de façon continue son action en boucle fermée d'asservissement avec les perceptions, pour qu'in fine l'objectif soit atteint. En fait, comme nous le verrons, l'agent AG choisira et dosera pour sa fonction cognitive FC les perceptions suivant le déroulement de l'action, se servant de la mémoire court terme Mct pour placer provisoirement en automatique mental certaines actions élémentaires temporairement retirées du mode conscient, conservant ainsi sa capacité consciente pour prendre ou reprendre en mode conscient d'autres actions élémentaires en boucle fermée.

3.5.7 – Objectifs

Toute action cognitive est sujette à un objectif, conscient ou inconscient. On a ainsi une cascade d'objectifs concomitants, de façon de plus en plus à court terme suivant les éléments considérés dans le sens du global vers l'élémentaire : la mission, l'action gérée par le processeur opérationnel PO, celle gérée par les agents AG, celles gérées par leurs fonctions cognitives FC.

Dans ces dernières il y a plusieurs niveaux. Une fonction cognitive peut avoir un tâche, donc un objectif clair mais nécessitant des actions élémentaires compliquées. Par exemple l'interception en pilotage manuel d'une altitude est confiée à une fonction cognitive gérant la manœuvre de façon globale, mais attribuant les actions élémentaires à des fonctions cognitives élémentaires contrôlant l'altitude, la vitesse, l'assiette, ou la poussée. On peut dire que ces fonctions cognitives élémentaires ont des « sous-tâches » comme objectifs.

L'atteinte, ou l'échec de l'atteinte, d'un objectif « remonte » la filière des éléments dans le sens inverse : FC, AG, PO, ce dernier jugeant en dernier ressort des mesures à prendre.

L'importance des objectifs est considérable dans les actions à très court terme qui nous concernent. L'allocation d'une tâche par le processeur PO à un agent équivaut à la désignation d'un objectif à cet agent.

3.5.8 – Perceptions

Ce chapitre complète le Chapitre 3.5.4.

Les perceptions au niveau opérationnel ont été traitées de façon remarquable par *P Lecomte et JC Wanner* (Lecomte & Wanner, 2004).

Les 4 canaux principaux de perception sont la vision, l'audition, les perceptions corporelles d'accélération et de rotation, et le toucher. L'expérience a largement prouvé que la vision est le canal le plus fiable et le plus précis. L'audition est réservée aux alarmes et aux échanges verbaux. Les perceptions corporelles d'accélération sont à la fois peu précises et peu fiables pour en déduire un positionnement spatial, à tel point que l'éducation de base des pilotes exige la neutralisation intellectuelle de ces perceptions d'inertie et de rotation pour ne retenir que les perceptions visuelles de lecture des instruments de vol.

Pour mémoire nous mentionnerons l'odorat qui peut jouer un rôle important dans le cas de panne interne à l'avion, hors de propos de cette thèse.

Le toucher est le canal principal de transmission des actions (sur le manche, sur le palonnier, sur les leviers de poussée, sur les sélecteurs).

Les particularités très importantes dans le pilotage sont les suivantes :

- le pilotage aux instruments est la base du pilotage des avions de transport ;
- les informations sont surtout présentées sous une forme symbolique avec un mélange de paramètres quantitatifs et d'informations sémantiques ;
- leur ensemble est exploité par tous les agents, qui les sélectionnent individuellement suivant la nécessité de l'exploitation des modèles mentaux MM choisis par eux ;
- ces informations expriment à la fois une situation présente (donc la base du début d'une phase d'action) et le résultat des actions effectuées ; elles sont le reflet de la continuité permanente des actions, soit conscientes et traitées en boucle fermée, soit automatiques et le plus souvent laissées en boucle ouverte.

En effet dans le processeur opérationnel PO se trouve la mémoire court terme Mct commune à tous les agents, c'est-à-dire à toutes leurs fonctions cognitives FC conscientes. La durée d'une séquence allouée à un agent peut être brève, parfois inférieure à la seconde. Il est

donc essentiel que pour un agent donné ses séquences se succèdent à l'intérieur de la rémanence de mémoire court terme Mct requise, entre 10 et 20 sec maximum pour les cas nous intéressant. Comme la vision passe par un seul canal pour tous, le processeur PO (ou son agent principal AP1) doit distribuer l'orientation du regard afin de contenter les agents qu'il sélectionne pour qu'ils accomplissent les tâches assignées. C'est le balayage visuel des instruments de bord et/ou au travers du pare-brise pour l'extérieur. Les pilotes sont éduqués à ce balayage dès le début de leur formation.

Un point important est que les phénomènes dynamiques extérieurs sont observés quantitativement non seulement d'après leur grandeur détectée mais aussi d'après le sens et la rapidité de leur variation, de leur dérivée. Cette perception mentale temporelle de la « vitesse du déroulement des actions », de leur dérivée en fonction du temps, ne peut se faire que grâce à l'utilisation immédiate et continue de la mémoire court terme Mct.

La vision fait l'objet depuis longtemps de recherches précises, en particulier de modélisation de l'attention visuelle (Andrieu, Dehais, Lesire, Izaute, & Tessier, 2008).

Notez que la vision centrale est utilisée lorsqu'une grande attention est requise, c'est-à-dire le plus souvent. Mais elle est distribuée de façon spatiale par le balayage visuel. A la distance entre l'œil du pilote et les instruments, la trace de ce cône de vision centrale de 3° représente sur les écrans un cercle d'environ 3 cm de diamètre (alors que les principales échelles sont distantes entre elles de 5 cm environ).

Cependant la vision périphérique fonctionne en permanence et permet des détections exploitées par l'agent AP2 (vigilance) ou par des fonctions cognitives automatiques autonomes (par exemple le maintien des ailes horizontales en pilotage à vue de l'extérieur), sauf en cas de focalisation de l'attention où elle est inhibée. La vision périphérique est très importante même si elle est inconsciente lorsqu'on est en conditions de vol à vue. La perte de cette vision peut être à l'origine d'accidents ainsi que nous le verrons dans l'analyse du cas n°4 de l'Annexe 2.

Evidemment si un agent ou l'une de ses fonctions cognitives s'attardent au-delà de la durée permise par la mémoire court terme Mct ils pénalisent les autres qui fonctionneront en mental automatique délégué et qui auront la nécessité de « repartir à zéro » lorsqu'ils seront autorisés à traiter leurs propres paramètres. Si les paramètres nouvellement perçus sont assez proches de ceux que la fonction cognitive FC a estimés en boucle ouverte, le recalage s'effectue sans problème. Sinon un nouveau traitement de situation s'imposera au processeur PO, avec une obligation d'attention soutenue, donc avec mobilisation importante de la capacité mentale et de la mémoire court terme Mct.

Tout cela est surtout important en pilotage manuel. Les automatismes des équipements permettent normalement de soulager cette contrainte temporelle dans certaines fonctions. Sauf si par exemple leur comportement est perçu par l'agent AP2 comme étant anormal, ce qui mobilise l'attention !

On a mentionné que les perceptions inertielles étaient trop peu fiables pour être exploitées de façon consciente si elles n'étaient pas confirmées par la vision, par exemple en pilotage à vue, en voltige aérienne en particulier. Cependant le cas n°1 des analyses de cas comporte

comme hypothèse que le pilote s'est fié à sa sensation de verticale apparente. Cela mérite une explication.

Le corps détecte les accélérations auxquelles il est soumis. Ainsi en vol horizontal stabilisé le pilote et ses passagers sont soumis à la seule accélération de la pesanteur, et sur leurs sièges ils perçoivent cette accélération comme étant à la verticale, orientée vers le bas. En revanche, au sol au décollage, ils sont soumis aussi à l'accélération horizontale sur la piste et la force d'inertie plaque leur dos contre leur siège. La combinaison des deux accélérations, celle horizontale de la mise en vitesse et celle verticale de la pesanteur, leur donne sur leur siège la même impression que s'ils étaient en montée à forte pente, donc avec une verticale « apparente » associée à une montée. Ce phénomène de sensation de montée se reproduit par exemple en vol à peu près horizontal (avec une pente de trajectoire de plus ou moins 10° autour de l'horizontale), lorsque l'accélération sur trajectoire vers l'avant est importante, en donnant l'impression comme au décollage que la verticale ressentie (verticale apparente) indique une montée, ce qui peut ne pas être vrai ainsi qu'on le verra.

3.5.9 – Fonctionnement temporel

Il est régi par les fonctions cognitives **FC** qui utilisent le temps interne, c'est-à-dire les constantes de temps des combinaisons neuronales, en adaptant les modèles mentaux **MM** aux situations et aux objectifs. La mesure et l'évolution de ce temps interne sont encore des inconnues quantitatives exactes alors que le temps physique est mesurable, et mesuré dans les cas analysés. Le Chapitre 4.5 donne la solution adoptée dans la thèse.

4 – MODELE UTILISE

4.1 – SCHEMA FONCTIONNEL CINEMATIQUE DE BASE

Le schéma n° 7 ci-après représente les liaisons entre les fonctions mentales opérationnelles dans le cerveau.

Les symboles suivants sont utilisés :

T : zone de transposition des sensations (visuelles, auditives, tactiles, inertielles, etc) en informations permettant le traitement mental, grâce à des modèles mentaux particuliers,

I : zone interface entre les ordres mentaux de mouvement et les transmissions vers les muscles,

S : stockage en mémoire des informations,

AA : fonction cognitive automatique autonome,

AD : fonction cognitive automatique déléguée par un agent,

AP1 : agent principal n°1,

AP2 : agent principal n°2,

AGx : agent ayant une fonction opérationnelle « x ».

Les zones entourées de rouge sont celles où opèrent les fonctions cognitives FC.

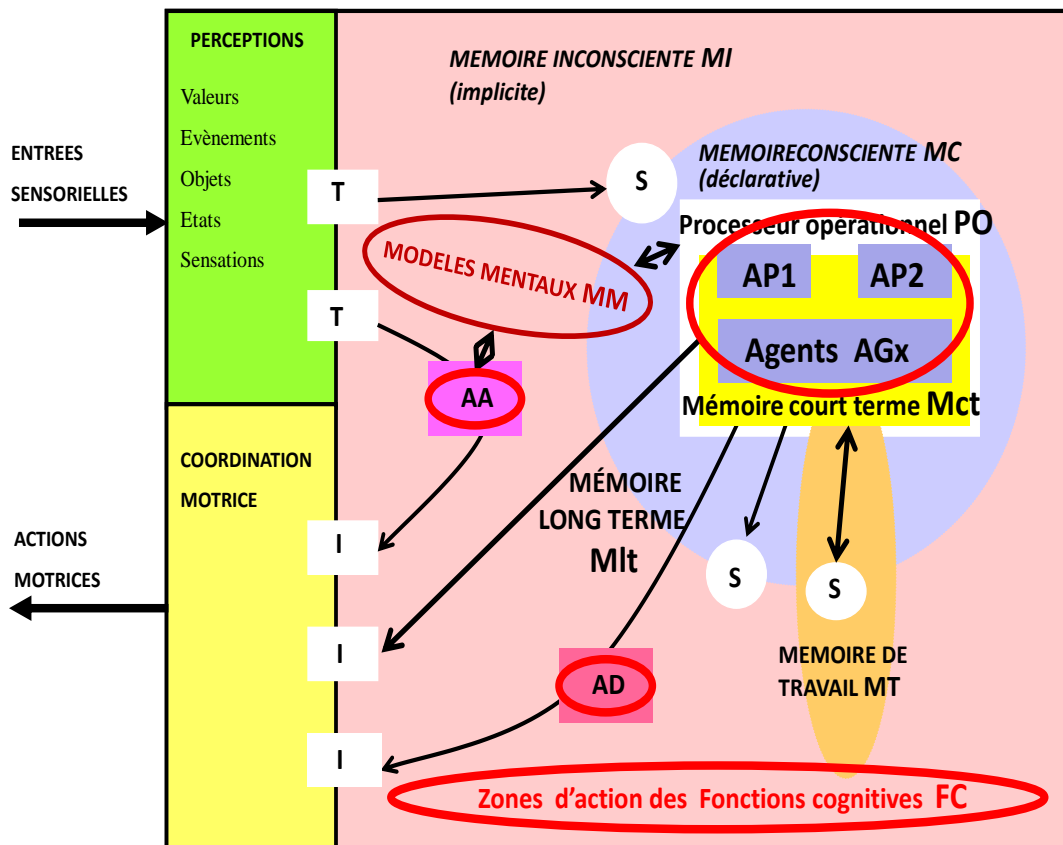


Figure 7 : Schéma fonctionnel de base

Il est évident à la vue du schéma qu'on ne peut pas y traiter les événements impliquant les interférences chronologiques des fonctions entre elles. Tous les éléments pertinents s'y trouvent, mais de façon intemporelle. Ainsi que nous le verrons les fonctions cognitives permettent ce traitement temporel.

La recherche du comportement dynamique, c'est-à-dire en fonction du temps, se place forcément dans le fonctionnement temporel chronologique des FC, entre les entrées sensorielles et les sorties actions résultantes, au niveau de l'exécution des tâches.

4.2 – FONCTIONNEMENT DYNAMIQUE

La fonction cognitive FC introduit le caractère dynamique des relations cognitives. Le schéma chronologique suivant en donne le mécanisme temporel pour une action consciente en boucle fermée.

Dans ce schéma il faut noter que la 1^{ère} ligne concerne déjà une fonction cognitive lorsque le processeur PO confie la poursuite d'un objectif à un agent AG (niveau NGO2 du Chapitre 4.3.3 suivant).

Ensuite, en vue d'atteindre cet objectif l'agent confie une tâche déterminée, qui devient donc un objectif particulier, à une autre fonction cognitive qu'on qualifiera de **FC « d'exécution »** (niveau NGO1 du Chapitre suivant 4.3.3).

**Processeur opérationnel PO => objectif => agent AG1 =>
=> tâche1 => FC1 => perceptions => MM1 => diagnostic/action =>
=> perceptions (résultat) => contrôle => AG2 =>
=> tâche2 => FC2 =>
=> *déroulement continu sur la mémoire court terme Mct***

4.3 – NIVEAUX D'INTERVENTION DES FONCTIONS COGNITIVES

Ceci est une classification simplifiée permettant la compréhension de la dynamique des actions mentales élémentaires. Les niveaux sont dérivés des analyses des cas d'accidents et d'incidents de la thèse et du schéma fonctionnel cinématique proposé, et ils introduisent les liaisons chronologiques entre les fonctions mentales.

Remarque importante : quel que soit le niveau d'intervention des fonctions cognitives, les FC d'action consciente opèrent toutes sur la mémoire court terme Mct, et se trouvent donc en « compétition » pour en partager la durée de rémanence.

4.3.1 - Niveau basique inférieur automatique (NBIA)

Il est concerné par le fonctionnement mental automatique en fonction d'un objectif (par exemple la tenue d'altitude en pilotage manuel).

C'est le niveau des fonctions cognitives **FC automatiques**, mentales inconscientes. Elles n'utilisent pas la mémoire court terme Mct comme base temporelle d'action tout en déroulant leur action sur un mode chronologique. La fonction FC concernée soit est une continuation de fonction consciente interrompue, soit provient d'une programmation en mémoire long terme Mlt ou de travail MT.

Ainsi 2 types sont à considérer :

a - Les fonctions cognitives automatiques déléguées par le processeur opérationnel ou les agents

A l'origine l'objectif est généralement fourni de façon consciente par le processeur opérationnel PO ou par un agent, AP ou AG. Puis il est pris en compte par une fonction FC d'exécution bâtie par l'agent AG à partir des perceptions disponibles et d'un modèle mental MM choisi dans la mémoire Mlt correspondant à l'objectif sélectionné. C'est par exemple dans le pilotage manuel continu le cas où le balayage visuel amène à changer fréquemment de paramètre de conduite, vitesse altitude, assiette, donc à interrompre momentanément le contrôle conscient de l'un pour traiter les autres:

AG => Objectif + Perceptions (vue, audition, toucher, inertie) => MM (Mlt ou MT) => => FC

Une fois lancée la fonction FC (ici interrompue) fonctionne seule en boucle ouverte sur le schéma :

Entrées (sensations perçues) => FC [tâche = {MM + objectif}] => Sorties (action)

Pour ce type de fonction FC en action mentale automatique déléguée il n'y a pas de retour conscient d'asservissement «Sorties <=> Entrées», permettant de corriger les dérives dans les actions par rapport à l'objectif assigné.

En général les recalages par retour d'asservissement s'effectuent de façon consciente par une brève exploitation consciente en brève boucle fermée de paramètres d'entrée essentiels (coup d'œil, toucher, son), normalement en quelques 1/10^{èmes} de sec, pour des pilotes expérimentés.

b – Les fonctions cognitives automatiques autonomes

Elles sont de même nature que les précédentes mais une fois lancées par le processeur PO elles se gèrent elles-mêmes en boucle fermée grâce à un retour inconscient dans des cas où les habiletés sont innées et/ou « éduquées » et placées sur la mémoire de travail MT (par exemple équilibristes, séquences de voltige aérienne, conduite automobile, vélo). On a alors :

PO => Objectif + Perceptions (vue, audition, toucher, inertie) => MM (Mlt ou MT) => => FC

Une fois lancée la fonction FC opère seule sur le schéma :

Entrées (sensations perçues) => FC [tâche = {MM + objectif}] => Sorties (action)

avec le retour d'asservissement, le contrôle automatique des actions vis-à-vis de l'objectif :

Sorties => FC {Sorties/ Entrées => tâche => recalages} => Sorties

4.3.2 - Niveau basique inférieur conscient (NBIC)

Il est concerné par le fonctionnement conscient en fonction d'un objectif (par exemple l'interception d'une altitude en pilotage manuel).

C'est le niveau des fonctions cognitives **FC conscientes**, lancées et gérées par des agents AGx.

Ce cas est identique au précédent, celui des fonctions cognitives automatiques autonomes ou déléguées, mais avec en supplément un retour d'asservissement conscient permanent assurant que l'objectif assigné est bien respecté :

AG => Objectif + Perceptions (vue, audition, toucher, inertie) => MM (Mlt ou MT) => FC

Une fois lancée la fonction FC fonctionne sur le schéma :

Entrées (sensations perçues) => FC [tâche = {MM + objectif}] => Sorties (action)

avec le retour d'asservissement, le contrôle conscient des actions vis-à-vis de l'objectif :

Sorties => FC {Sorties/ Entrées => tâche => recalages} => Sorties

Ces actions se déroulent de façon chronologique sur la mémoire court terme Mct.

Remarques sur le fonctionnement cognitif de ce niveau :

- ce sont les mêmes canaux de perception qui assurent l'accès aux informations nécessaires, simultanément pour leur traitement initial et pour le contrôle des actions lancées : l'observation de la vitesse sur l'instrument PFD Primary Flight Display par exemple, ou la pression tactile sur le manche ;
- mais leur traitement conscient s'effectue en séquence sur la mémoire court terme Mct.

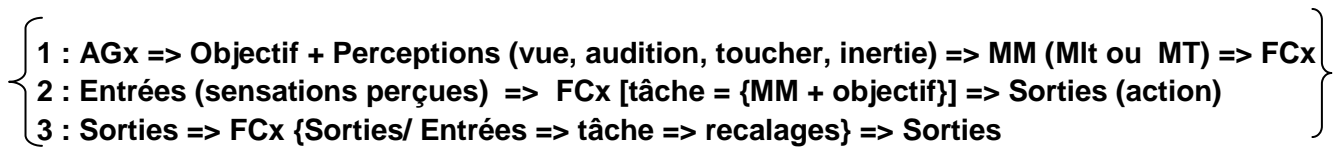
4.3.3 – Niveaux supérieurs conscients gestionnaires des niveaux basiques (PO, AP1, AP2, AGx)

Dans le monde séquentiel conscient la gestion temporelle des actions s'effectue en partage de la capacité cognitive sur l'échelle de temps de la mémoire court terme Mct. Le pilotage

des avions exige l'exécution simultanée, souvent continue, de multiples tâches, donc avec l'allocation de créneaux temporels pour chaque élément de tâche, tâche qui devient un objectif. Nous supposons ici que ce « dispatching » intervient à plusieurs niveaux « de responsabilité ».

- 1^{er} Niveau de gestion opérationnelle (NGO 1)

Immédiatement en contact avec le niveau basique inférieur conscient NBIC, l'allocation appartient à l'agent opérationnel **AGx** en charge de la tâche, par exemple l'interception manuelle d'une altitude de vol. Il intervient pour chacune de ses tâches suivant le triple schéma chronologique précédent :



Mais comme l'atteinte de son objectif exige la combinaison de plusieurs sous-tâches élémentaires évolutives, tenue de vitesse avec contrôle de la poussée des moteurs, diminution de l'assiette longitudinale avec respect d'un facteur de charge tolérable par les passagers, contrôle de la vitesse verticale en fonction de l'altitude pour tangenter l'altitude objectif, l'agent combine ses perceptions sensorielles (vision de chacun des 5 paramètres clés cités, pression sur le manche et sur les leviers de poussée) de façon continue car il s'agit d'une manœuvre unique et continue, mais en passant de la gestion de l'un des 5 paramètres à l'autre grâce au balayage visuel qu'il commande en fonction de l'exigence des modèles mentaux élémentaires MM de chaque tâche élémentaire utilisés.

Ceci signifie :

- que le modèle mental MM global utilisé est complexe et combine un ensemble de connaissances, de procédures et d'habiletés acquises par la formation et l'expérience, qu'il est donc un ensemble cohérent de MM élémentaires intéressant un ensemble complexe de fonctions cognitives gérées par un agent,
- que la fonction cognitive FCx choisie et lancée par l'agent AGx attribue à chaque tâche, sous-tâche, élémentaire une « sous-fonction cognitive » élémentaire avec le créneau temporel nécessaire,
- que pendant les périodes où elle gère l'une des tâches assignées en mode basique NBIC, conscient, cette fonction FCx passe les autres tâches élémentaires lancées en mode basique NBIA, mental automatique délégué; mais elle les reprend sur la mémoire court terme Mct en mode NBIC, conscient, pour contrôle, poursuite des actions et recalage éventuel,
- que la fonction cognitive FCx gère son nécessaire balayage visuel.

- 2^{ème} Niveau de gestion opérationnelle (NGO 2)

Il se situe au-dessus des agents opérationnels AGx. Il concerne la gestion de l'ensemble de ces AGx qu'il sélectionne en fonction des objectifs opérationnels de haut niveau tels que la poursuite de la mission, l'adaptation aux aléas du vol. C'est l'agent gestionnaire, le premier

agent principal AP1 qui utilise des modèles mentaux MM complexes à base de connaissances et d'expérience. Il utilise lui aussi les perceptions sensorielles et la mémoire court terme Mct en compétition avec les agents AGx qu'il gère. Mais ses tâches étant surtout dédiées à la résolution de problèmes fréquemment non strictement prévus de façon temporelle, son utilisation de la Mct est plus importante que celle de ses AGx. D'où la possibilité de saturation de la Mct, et le recours à la mémoire de travail MT.

Le phénomène de focalisation de l'attention pourrait à ce niveau altérer le fonctionnement de l'agent principal AP1 par saturation de la mémoire court terme Mct utilisée de façon intensive par un autre agent.

- 3^{ème} Niveau de détection d'anomalies (NDA)

Il semble indépendant des précédents tout en s'y connectant par l'analyse des perceptions et leurs combinaisons avec les objectifs, aussi bien ceux de l'agent AP1 que ceux des agents AGx. C'est le deuxième agent principal AP2. Son action n'est apparemment pas consciente de façon permanente mais se situe en parallèle et non en séquence avec les autres agents. En revanche son action de communication d'anomalie est directe sur AP1 (ou sur le processeur PO) qui alors utilise la mémoire court terme Mct pour résoudre le problème transmis.

Son fonctionnement de base est inconscient, mental automatique. L'hypothèse retenue ici est une comparaison permanente et inconsciente des sensations présentes reçues à des images ou modèles mentaux stockés dans les mémoires long terme Mlt et/ou dans la mémoire de travail MT. La surimposition de deux images ou modèles semblables (l'un de situation présente et l'autre mémorisé) provoquerait une réaction (résonance mentale?) de détection soit de différence soit de similarité, suivant les cas. Cette réaction serait perçue par le PO, probablement au niveau de l'agent AP1, et resterait de façon inconsciente sous forme latente de préoccupation prête à devenir consciente si un autre événement surgissait, ou serait traité de façon consciente si le contraste (la saillance) était suffisant.

- 4^{ème} Niveau supérieur conscient (NSC)

C'est le niveau englobant tous les autres, définissant les objectifs de haut niveau, tels que la mission elle-même, les relations au sein de l'équipage, le commandement et la responsabilité.

On peut ajouter ici les actions consécutives à l'apparition sous stress de la FCTB (Fonction Cognitive Type de Base) du Chapitre 7.3.1.

Il s'agit du processeur opérationnel conscient **PO**. Il gère donc les différents niveaux mais peut se trouver en compétition avec eux pour l'utilisation de la mémoire court terme Mct suivant l'importance et la priorité des actions lancées. Par exemple une focalisation saturant la Mct peut paralyser l'action du PO.

4.4 – L'UTILISATION EFFICACE DES ACTIONS COGNITIVES DISCONTINUES

Les actions cognitives élémentaires, dont la durée est de l'ordre du $1/10^{\text{ème}}$ de seconde à quelques secondes, initiées et contrôlées de façon dynamique par les fonctions cognitives élémentaires, impriment des traces éphémères discontinues sur la mémoire court terme Mct. Chaque trace est différente de la précédente et de la suivante car correspondant à une boucle fermée d'action élémentaire particulière, ainsi que décrite dans le Chapitre précédent, traitant en perception/décision/action/contrôle un paramètre particulier, par exemple la tenue de vitesse ou celle d'altitude, ou celle d'assiette longitudinale. Ainsi le mélange dynamique des actions élémentaires conscientes se succédant en boucles fermées se traduit par une succession d'actions de natures différentes s'imprimant de façon continue en une succession de traces discontinues sur la mémoire court terme Mct.

En particulier lorsqu'il est nécessaire de traiter simultanément, par exemple par balayage visuel, plusieurs paramètres dispersés sur plusieurs figurations, on voit immédiatement la nécessité de fractionner une action globale en de nombreuses actions élémentaires, et on est alors obligé de placer temporairement une partie de ces actions en fonctionnement automatique délégué afin de satisfaire l'ensemble continu des actions tendant vers l'objectif fixé.

C'est une adaptation du traitement conscient séquentiel à la capacité limitée de rémanence de la mémoire court terme Mct. Elle permet de traiter ainsi des boucles fermées d'actions continues de durée importante, par exemple une mise en palier, sans pénaliser l'ensemble des actions élémentaires simultanées impliquées (contrôle permanent de l'ensemble vitesse, altitude, vitesse verticale, poussée).

La focalisation de l'attention, en augmentant le temps de traitement d'un paramètre particulier, diminue la place temporelle disponible à d'autres actions. Lorsque la place prise par la focalisation prend la totalité de la capacité de la mémoire court terme le phénomène d'effet tunnel est probable.

4.5 - QUEL TEMPS UTILISER ? LE SEQUENCEMENT

Comme déjà dit il est largement démontré que les bases de temps utilisées par le comportement humain diffèrent du temps de référence physique adopté universellement, avec de grandes variations liées à des facteurs aujourd'hui non mesurables tels que charge de travail, attention, stress. Or les pilotes sont en relation directe, en contact direct, avec les machines et les équipements qu'ils conduisent et qui sont régis par les lois physiques ayant le temps physique comme référence unique et immuable. Donc comment relier l'analyse des phénomènes mentaux de comportement aux événements physiques régissant matériel et environnement ?

En réalité un choix entre les deux types de temps n'existe pas : on doit ne considérer que le temps physique pour l'ensemble pilote-avion-environnement. La thèse donne une réponse utilisable, par son obligation d'analyser les événements sur de très courtes durées.

Ainsi pour la période d'analyse choisie, de durée proche de la minute, nous découpons cette durée en séquences correspondant à des tâches opérationnelles élémentaires observées ou connues, en segments temporels, ce qui donne des durées variables de séquences allant le plus fréquemment de la seconde à une dizaine de secondes ou plus.

Et chaque séquence est considérée comme une unité temporelle séparée qu'on peut relier à la précédente et à la suivante, et à laquelle on applique le modèle cognitif défini dans ce Chapitre, permettant une analyse fine du comportement cognitif qu'on peut relier alors directement aux événements extérieurs observés et mesurés.

Les 5 cas d'accidents et d'incidents retenus ont été analysés avec succès de cette façon. Ils comportent en leur totalité 35 séquences pour un total cumulé de 334 secondes, soit une moyenne d'environ 9,5 sec par séquence, avec une variabilité allant de 1 sec pour les plus courtes à 60 sec pour la plus longue. Les séquences les plus intéressantes varient entre 1 et 10 secondes.

4.6 - PROCESSUS DE L'ANALYSE COGNITIVE EFFECTUEE

Pour chaque séquence élémentaire, c'est-à-dire pour chaque segment temporel, nous utilisons la technique suivante basée sur le concept très utilisé en simulation aéronautique de « reverse engineering ».

Nous comparons les « entrées cognitives » aux « sorties cognitives » en triant les fonctions cognitives et en ne retenant que celles rendant opérationnellement possible leur association. Les entrées sont les perceptions visuelles, auditives, tactiles, inertielles à la disposition du pilote. Les sorties sont les résultats objectivement observés (mouvements, état observé des systèmes, paroles, etc.).

Les fonctions cognitives FC possibles sont celles qu'opérationnellement on peut définir pour obtenir les résultats observés. Chacune de ces FC utilise ses perceptions propres qu'il faut choisir opérationnellement.

Certaines séquences autorisent plusieurs fonctions cognitives, autant d'hypothèses qu'il est nécessaire de prendre en considération dans l'analyse des séquences suivantes. Parfois ces séquences suivantes obligent à revenir sur des hypothèses pour les éliminer ou les modifier. Ce travail exige une expertise opérationnelle importante car c'est la partie technico-psychologique essentielle de l'analyse.

4.7 – DESCRIPTION DE LA METHODE D'ANALYSE UTILISEE

4.7.1 – Séquencement

La phase de vol considérée, de l'ordre de la minute, est jalonnée de repères observables, temps relevés, manœuvres d'équipements, conversations, alarmes, trajectoires, etc.

Ces jalons permettent de définir des segments temporels de durée variable pendant chacun desquels il est possible de concevoir une activité cognitive opérationnelle élémentaire déterminée et de faible durée, de 1 seconde à plus de 10 secondes suivant les cas.

Ce type d'analyse temporelle concrète correspond à la représentation théorique d'interactions par blocs de connaissances (Boy, 1998).

4.7.2 – Analyse par séquence

Quatre pas sont systématiquement suivis dans chaque séquence :

A - description de la situation

On rapporte les faits et résultats observés ou enregistrés tirés des rapports et pertinents pour la séquence.

B - action normale souhaitée (tâche normale)

Pour la séquence et la phase de vol considérées on donne l'action et le comportement correspondant à l'utilisation normale des procédures et des pratiques adaptées à la situation. Cela permet de repérer les déviations éventuelles en y attirant l'attention.

C - action effectuée (activité/action réelle)

On porte ici le comportement soit observé, soit déduit de la meilleure connaissance des relations d'interfaçage pilote-avion.

Pour les cas de l'Annexe 2 le traitement est fait d'après le Chapitre 2 ou d'après l'expertise opérationnelle.

Cette partie est le socle d'analyse « classique » de l'analyse cognitive suivante.

D - actions cognitives élémentaires (agents et fonctions cognitives)

C'est ici que s'effectue l'analyse cognitive fine, en associant les résultats observés, **les sorties**, aux perceptions possibles, **les entrées**, qu'on définit au mieux des connaissances d'expertise opérationnelle.

On utilise le modèle et le fonctionnement dynamique décrits dans le Chapitre 4.

Cependant, compte-tenu de la brièveté des séquences et de leur aspect prioritairement opérationnel, sauf mention spéciale on analysera surtout les fonctions cognitives FC d'exécution, c'est-à-dire celles mises en œuvre par les agents.

Les agents, fonctions cognitives, modèles mentaux utilisés permettent l'adoption d'hypothèses de comportements possibles, pas toujours « probables » au sens des statistiques.

Il s'agit là de la transcription de l'action effectuée en mécanismes cognitifs du comportement d'un pilote d'après les Chapitres 3 et 5.

Les parties C et D de l'analyse décrivent les mêmes choses de façons différentes. Cependant l'analyse cognitive fine de la partie D permet d'éviter des jugements prématurés d'après des considérations subjectives, allusions à des erreurs, à l'indiscipline, à la fatigue, etc.

4.7.3 – Exploitation

Mis à la suite les uns des autres les comportements cognitifs élémentaires décrivent une « réalité possible » de comportement permettant la recherche des éléments pouvant l'avoir influencé de façon positive ou négative.

Seul l'aspect cognitif immédiat est pris en compte. Il faut remarquer que ce type d'analyse ne préjuge en aucune sorte de l'existence « d'erreurs » ou « de paramètres affectifs ». C'est éventuellement l'exploitation globale qui pourrait les détecter ou les définir.

Mais la participation de l'expertise opérationnelle est primordiale.

Dans le Chapitre 2 nous avons vu combien la tâche immédiate des pilotes est complexe et exige le traitement rapide et coordonné d'un ensemble de savoir, savoir-faire, savoir-être façonné par l'expérience. Sans la connaissance exacte de l'utilisation de cet ensemble dans chaque contexte, dans chaque situation, dans chaque combinaison de situations, il est illusoire de penser pouvoir juger leur comportement. Cette expertise n'est acquise que par le murissement de cet ensemble de savoirs soumis à l'épreuve de la réalité opérationnelle concrète. Le Chapitre 6 et son Annexe 3 montrent comment l'expertise de certains, prise dans une communauté de pratiques, a été utilisée.

5 - ANALYSE DE CAS

5.1– PRELIMINAIRES

5.1.1 - Cas étudiés

Nous rappelons les critères utilisés pour leur choix :

- possibilité d'avoir les informations détaillées et fiables nécessaires ;
- situations de caractère soudain, inattendu, rapide, dangereux ;
- phases de vol près du sol, au décollage ou à l'atterrissage, classées parmi les plus fréquemment accidentogènes (2/3 des accidents⁴);
- matériels techniquement modernes ;
- cas les plus diversifiés possibles pour éviter la focalisation sur un seul type d'évènements ;
- mélange d'évènements ayant été maîtrisés ou ne l'ayant pas été.

Notez un point essentiel : il s'agit uniquement du comportement opérationnel sous stress et la durée de l'évolution des situations est de l'ordre de la minute, souvent inférieure, ce qui exclut toute possibilité pour le pilote d'une exploitation cognitive autre que celle de la situation présente, la concentration sur cette dernière étant ainsi par hypothèse supposée totale.

Afin d'éviter une trop grande variabilité des paramètres d'analyse, volontairement nous n'avons choisi que des cas où tous les systèmes avion fonctionnent de façon prévue (sans panne pendant l'évènement analysé), où les pilotes ont la tâche immédiate de la conduite manuelle de l'avion, et ne montrent aucun signe apparent de fatigue ou de problème individuel.

5.1.2 - Utilisation du modèle choisi pour l'analyse

Cette analyse est la partie importante de la thèse car tout en étant la base des recherches elle nécessite une grande acuité dans la traduction des comportements en termes cognitifs. Elle est le support indispensable à l'explication cognitive des comportements, et à la tentative de remédier aux résultats dangereux potentiels en découlant.

Pour l'effectuer on utilise le modèle présenté dans le Chapitre 4, ainsi que les informations sur le pilotage des avions données dans le Chapitre 2.

Enfin le Glossaire peut être utilement consulté à la demande au fur et à mesure de la lecture du présent Chapitre 5 et de l'Annexe 2.

5.1.3 – Bases de l'analyse

Le processus utilisé est celui du Chapitre 4.7.

L'analyse a été possible par l'utilisation de trois moyens clés :

- ***La relation temporelle dynamique*** entre évènements se succédant, observés de l'extérieur et le plus souvent liés à la stricte mécanique du vol, et les phénomènes cognitifs

⁴ 66% entre 2000 et 2009 d'après l'IATA Safety report 2009

intérieurs déduits des comportements et situations observés, liés aux « mécanismes cognitifs » beaucoup moins strictement connus.

*Remarque : Cependant, pour un pilote dans un avion ces mécanismes cognitifs sont obligatoirement basés sur le traitement de perceptions, en très grande partie visuelles, tirées des informations présentées par les équipements du cockpit qui eux n'ont pas d'état d'âme. Ceci implique une très forte relation directe entre l'interface visuelle ou tactile et le traitement de ces informations : il n'y a pas d'échappatoire possible dans une séquence opérationnelle dynamique. Par exemple le traitement de la vitesse passe obligatoirement par la lecture quantitative de l'échelle des vitesses. Si cette lecture n'est pas effectuée, ou si elle est erronée, la suite du vol qui obéit aux lois de la mécanique du vol, en subit la conséquence. On pourra en tirer l'hypothèse probable (estimée > 90%) qu'il y a eu soit panne du système, soit une erreur ou un oubli dans la perception du paramètre vitesse, ce qui restreint beaucoup les possibilités de divergence d'interprétation. **Donc s'il y a divergence observée elle ne peut venir que d'une panne de l'équipement, d'une erreur ou d'une omission humaine. Dans ces cas le résultat observé donne la direction de recherche et très souvent la solution elle-même.** La difficulté vient de la grande technicité spécifique à l'aéronautique moderne peu compatible avec des explications simples à des non initiés. Ici dans les cas choisis il n'y a pas eu de panne de système.*

- **L'expertise personnelle de l'analyste** permettant d'expliciter ces phénomènes cognitifs : ceci est peut-être critiquable dans le monde de la recherche, observant tout phénomène de l'extérieur et ne faisant aucune confiance à la subjectivité. Mais y a-t-il ici subjectivité ? On explique ici des phénomènes cognitifs fréquemment « vus » de l'intérieur du cerveau des pilotes et non au travers d'explications tirées de statistiques d'observations, ceci grâce à l'expérience acquise au cours de 41 années de pilotage, en essais en vol et en instruction, et à l'éducation de pilote d'essais où l'on se doit d'expliquer, et de rapporter tout phénomène rencontré à des explications logiques.

Cela d'autant mieux que le rédacteur s'est parfois trouvé dans des situations analogues à celles analysées ici, avec un comportement dont les traces mnémoniques sont suffisamment fortes pour qu'il en retienne des conclusions « objectives », ayant eu la chance que « ses » situations n'aient heureusement jamais viré à la catastrophe. Enfin il connaît assez bien l'aéronautique et les technologies utilisées dans les avions, qu'il a pratiquées, pour pouvoir s'avancer dans une traduction plausible des perceptions utilisées par les pilotes.

Nous pourrions donc parler d'objectivité basée sur des hypothèses probables plutôt que de subjectivité, le résultat rejoignant la réalité observée. Disons que les phénomènes intérieurs déduits ont une probabilité importante de se rapprocher du réel. A ce sujet on peut se rapporter à l'expérimentation ARCHIMEDE (Lecomte & Wanner, 1989, 1990) menée en 1987 pour la DGAC par *Pierre Lecomte, Jean-Claude et Nicole Wanner*, et dont la conclusion était que des équipages placés dans les mêmes situations critiques montraient des comportements identiques et faisaient les mêmes erreurs. Ce résultat comporte un autre volet : les équipages réagissent de façon quasi identique aux mêmes stimuli. Ainsi l'analyse par des pilotes des réactions d'un équipage à des stimuli donnés a une forte probabilité de pouvoir s'appliquer à tous.

Mais cette expertise personnelle a été confirmée, parfois corrigée ou complétée par celle d'autres experts ainsi que décrit dans le Chapitre 6, renforçant ainsi la crédibilité des

analyses. L'Annexe 3 précise les caractéristiques professionnelles de ces experts, gages de la crédibilité de leur jugement.

Autre raison de croire en l'expertise : les lois et concepts utilisés en psychologie proviennent d'expérimentations auxquelles on applique des règles mathématiques de probabilité montrant qu'on peut se fier aux résultats à $n\%$, n n'étant jamais égal à 100%. La rigueur mathématique ne s'applique donc là qu'au calcul des probabilités et non à ses conclusions essentiellement fonctions de l'expérimentation elle-même. Le recours à des expertises confirmées est-il fondamentalement différent ?

- **Une certaine rationalisation dans les analyses cognitives** : il s'agit là surtout de l'utilisation du modèle et de la méthode décrits dans les Chapitres 3 et 4.

5.1.4 - Présentation

Nous appliquons ici le processus du Chapitre 4.7.

Chaque cas est défini par une succession de séquences de courtes durées, choisies en fonction de l'évolution de la situation.

Pour chaque séquence nous adoptons la présentation suivante en 4 points:

- A : description de la situation** ; il s'agit des faits observés ou enregistrés tirés des rapports;
- B : action normale souhaitée (tâche normale)**; c'est le comportement normalement approprié à la situation, en application du Chapitre 2 et des procédures courantes;
- C : action effectuée** ; soit observée, soit déduite de la meilleure connaissance des relations d'interfaçage pilote-avion, en partie traitées dans le Chapitre 2 et d'après l'expérience personnelle;
- D : actions cognitives élémentaires** ; il s'agit là de la transcription des actions effectuées en mécanismes cognitifs du comportement d'un pilote d'après les Chapitres 3 et 5. Les points C et D décrivent les mêmes choses de façons différentes.

5.1.5 – Utilisation des experts – Cotation de validité

La validité de l'expertise dans certaines limites a été admise (Hoc, Amalberti, & Boreham, 1995) et il apparaît qu'elle puisse s'appliquer ici.

La validation de l'expertise utilisée dans les analyses a été obtenue par le jugement de huit experts, dont les opinions sont données au Chapitre 6 et dans l'Annexe 3.

Cette validité concernait:

- les éléments techniques sur la conduite des vols, les équipements, automatismes, procédures, sur la mécanique du vol ; ainsi l'avis des experts a permis de corriger certaines

erreurs ou ambiguïtés dans la première description des automatismes de systèmes dans les cas n°1 et 5.

- les hypothèses des analyses cognitives proposées, vues sous l'aspect opérationnel ; ainsi les experts ont permis d'ajouter des hypothèses supplémentaires dans les cas n°1, 2 et 3.

En plus de leur jugement qualitatif il leur a été demandé la cotation de toutes les analyses cognitives élémentaires des 5 cas, de la partie D des analyses des séquences élémentaires. Ils ont coté 208 du total des 35 (nombre total de séquences des 5 cas) x 8 experts= 280 parties D soumises à leur cotation d'après une échelle de 4 valeurs :

- 1 étant l'adhésion complète aux hypothèses proposées
- 2 étant l'acceptation, mais avec des restrictions à expliciter
- 3 étant le refus avec obligation d'en donner les motifs
- 4 étant le rejet total.

Ainsi 1 et 2 confirmaient l'acceptabilité, 3 et 4 le refus.

5.2 – ETUDE DES CAS

5.2.1 - Introduction

Les 5 cas suivants ont été analysés.

Cas 1 : A330 en remise de gaz

Perte de contrôle en remise de gaz difficilement explicable, probablement due à une focalisation de l'attention sur le seul indicateur de vitesse.

Cas 2 : A321 arrêt décollage

Interruption du décollage après la vitesse limite autorisée V1, due à la dérive des tâches hors de celles prescrites, par crainte d'une collision aviaire.

Cas 3 : Concorde, approche/atterrissage

Atterrissage dans des conditions extrêmes, dans un phénomène météorologique dangereux alors inconnu, suite à la décision de ne pas utiliser toutes les aides à l'atterrissage, disponibles mais de fiabilité incertaine.

Cas 4 : F/A-18, meeting aérien

Accident en voltige aérienne dû à l'accumulation de deux incidents amenant l'effacement en action consciente d'une séquence de figure aérienne. Manœuvre tardive de détresse n'empêchant pas la collision avec le sol. Avion détruit mais pilote sauf.

Cas 5 : A310, atterrissage

Accident au roulage d'atterrissage, dû à l'absence de décélération suite à la mise de gaz involontaire et ignorée du moteur gauche. L'entraînement involontaire et non décelé de son levier de poussée est provoqué par l'appui inconscient de la main du pilote au cours de la commande du mouvement du levier adjacent de réversion du moteur droit. Absence de contrôle normal par le copilote. L'avion sort de la piste sans que l'équipage ait eu conscience de l'origine du problème. Avion détruit, 123 victimes.

Ils ont été choisis dans une grande variété de situations, toutefois en éliminant les cas de pannes imprévues de systèmes avion, pour éviter de se concentrer sur quelques cas trop précis mais en essayant de rencontrer le plus possible de paramètres influents. Evidemment ils ne peuvent pas représenter la totalité de ces derniers mais la diversité empêche une focalisation parasite de l'analyse.

On y trouve des accidents, ayant tous donné lieu à des rapports officiels et publics, des incidents rapportés dans des comptes-rendus de diffusion restreinte (parfois confidentiels) dans les entreprises considérées, des récits écrits par des témoins acteurs directs et des personnalités/experts dignes de foi. Des extraits ont été prélevés, ou des résumés sont présentés ici, sur les particularités intéressantes pour cette recherche. Tous ont été dé-identifiés dans le texte.

Un exemple a été pris dans un accident d'avion militaire monoplace pour sa particularité intéressante au point de vue cognitif.

Les phases « avant événement », « événement » et « après événement » sont bien repérées. L'absence de caractéristiques affectives marquantes (fatigue, difficultés particulières du vol, conflit au sein de l'équipage) a été vérifiée dans les phases « avant événement ».

Le problème de la compréhension des procédures, des équipements et automatismes, des appellations et des acronymes aéronautiques (différents en français et en anglais) est difficile à résoudre sans une extension à l'excès des textes explicatifs. Le Glossaire rassemble les appellations techniques et cognitives, et partout où cela est nécessaire des encarts tentent de préciser les particularités spécifiques.

L'analyse des caractéristiques communes est faite dans le Chapitre 7.

5.2.2 – Etude des cas choisis

L'étude complète et détaillée des 5 cas est reportée dans l'Annexe 2. Cependant il a paru nécessaire de mentionner dans le présent document l'étude complète d'un cas pour en montrer l'originalité et le détail du mécanisme utilisé. Nous avons choisi le cas n°1 présentant toutes les caractéristiques des analyses. Il a été considéré comme étant le plus difficile par la plupart des experts.

5.3 – A330 – incident, approche, remise de gaz

5.3.1 – Résumé du cas

Rapport interne compagnie

ATTENTION : ce Résumé est en totalité extrait d'un rapport officiel et sert de base à l'analyse du Chapitre suivant

Circonstances

A330 en bonnes conditions.

PF Commandant de bord (CDB) avec 10 200 h de vol dont 400 sur A330. PNF copilote avec 4 000 h de vol dont 1 000 sur A330.

Vol retardé au départ de plus d'une heure pour des problèmes d'embarquement et d'ATC.

A la destination, après avoir évité des orages, en approche finale de nuit sur la piste 21, le CDB observe une composante de vent arrière supérieure à 10 kt et exécute une remise de gaz. A environ 1200 ft, à l'approche de l'altitude de remise de gaz affichée au FCU, l'assiette diminue au-delà de ce qui est nécessaire pour une mise en palier. L'avion redescend, des alarmes EGPWS « Pull-Up » se déclenchent et le copilote intervient. Le CDB réagit et reprend la montée vers 3000 ft. Une nouvelle approche et un atterrissage sont réalisés en piste 03. La perte d'altitude a été de 600 ft avec un point bas enregistré à 608 ft radioaltimètre au-dessus de la mer. L'assiette a atteint – 9,5° et la vitesse verticale a dépassé 4 000 ft/mn.

Déroulement

« L'A330 quitte le parking avec un retard de 1h14 pour des problèmes d'embarquement (saturation filtre, parking au large...).

La météo prévue à l'arrivée indique une possibilité d'orages. Le CDB est PF aux commandes.

En fin de croisière, l'équipage reçoit le message d'information de l'escale accompagné du METAR signalant un vent du 200° pour 10 kt, une visibilité supérieure à 10 km et un TEMPO TSRA (orage). Le METAR suivant indique un vent du 90° pour 8 kt et un TEMPO TSRA (orage et pluie), météo confirmée par l'ATIS.

Après un palier d'environ une minute à 1600 ft, l'axe et le plan de descente de l'ILS 21 sont rejoints simultanément à la verticale de la balise d'entrée d'approche, train sorti, volets 3, puis Full (plein sortis) à la mise en descente.

Après la capture du glide, vers 1500 ft, l'altitude sélectionnée au FCU passe de 1600 ft à 1700 ft. Le pilotage est repris en manuel (AP et ATHR OFF) à 1400 ft.

Pendant la finale, le vent arrière enregistré est en moyenne 20 kt jusqu'à 200 ft puis diminue vers 10 kt à 100 ft. Une remise de gaz est initiée à 80 ft RALT (Radioaltimètre, soit 80 ft au-dessus du sol). La séquence est conforme à la procédure avec une prise d'assiette initiale vers 12,5°, un affichage de la poussée TOGA, la rentrée des volets vers 3 puis la rentrée du train.

La composante de vent arrière aurait augmenté la distance d'atterrissage sur la piste 21, d'où le choix normal d'atterrir au cap inverse sur la piste dont l'appellation devient alors la piste 03.

L'assiette est pilotée entre 12° et 14° jusqu'à environ 950 ft QNH puis diminue au moment de l'activation de l'alerte sonore « Altitude alert » et du passage en ALT* (capture d'altitude).

L'« Altitude alert » et le mode ALT* apparaissent très tôt en raison de l'altitude basse sélectionnée au FCU. Les manettes sont placées dans le cran CLB pendant 8 secondes puis sont avancées vers MCT ce qui entraîne l'apparition du message clignotant « LVR CLB » (mettre les leviers sur le cran montée, Climb) sur le FMA. L'altitude enregistrée atteint son maximum, 1220 ft et commence à diminuer. Les volets sont rentrés de 3 vers 1+F à l'approche de la VFE (vitesse limite des volets sortis). L'assiette continue à diminuer. L'enregistreur indique que les manettes sont dans le cran FLEX MCT. Sept secondes plus tard, à 970 ft QNH, les manettes sont sorties du cran FLEX MCT vers le plein réduit pendant deux secondes puis sont placées en butée TOGA au moment de l'activation d'alarmes EGPWS. Ces alarmes sont enregistrées pendant 13 secondes. Il s'agit probablement des alarmes « Sink rate », « Terrain » et « Pull Up ». Tandis que l'assiette atteint - 9,5° et que le variomètre dépasse 4 000 ft/mn, une première augmentation de l'assiette et du facteur de charge est enregistrée à 870 ft QNH, pendant 3 secondes avec un facteur de charge de 1,3. Puis la ressource est reprise franchement à 608 ft RALT ou 583 ft QNH, au dessus de la mer. Le facteur de charge atteint 1,87.

La poussée TOGA, affichée lors de la première ressource avec une assiette en augmentation mais encore faible, entraîne une croissance rapide de la vitesse indiquée qui dépasse la VFE volets 1 d'une dizaine de noeuds. L'avion est ensuite stabilisé en palier à 3000 ft. Le Cdb effectue une annonce aux passagers. Après une évaluation de la météo et du vent sur le terrain, l'équipage effectue une approche VOR DME puis un atterrissage en piste 03. Le copilote est PF aux commandes, conformément à la répartition des tâches recommandée en approche classique de nuit. »

Analyse (incluse dans le rapport)

L'approche avec capture simultanée des LOC et Glide à 5 nm laissait peu de temps pour stabiliser les paramètres en finale. La trajectoire était choisie en raison des échos orageux.

La composante de 20 kt en vent arrière justifiait la remise de gaz effectuée correctement. Cependant l'altitude sélectionnée sur le FCU, 1700 ft, était celle de fin de virage et non celle de Remise de gaz, 2200 ft, du fait d'une confusion de lecture de la carte d'approche. La prise automatique d'altitude par le FD a fait croire à un dépassement d'altitude.

L'enchaînement des informations de vitesses et leur dépassement, de sélections de poussée, de corrections d'assiette longitudinale, de perception des accélérations, des alarmes de vitesse, d'altitude et de proximité du sol, au-dessus de la mer et dans l'obscurité ont amené une grande confusion. Les bonnes réactions ont finalement prévalu grâce à l'intervention vigilante du PNF copilote.

La phase entre la remise de gaz et la reprise de contrôle a duré environ 1 min 30sec et l'altitude minimale a été de 600 ft.

Une importante source de confusion a été la sensation d'accélération dans la combinaison des accélérations de la pesanteur, du facteur de charge et de l'accélération longitudinale, altérant la perception physiologique des assiettes. Cette sensation a prévalu sur les indications réelles des instruments.

Cette analyse pourrait expliquer plusieurs accidents survenus dans des circonstances analogues.

Assiette perçue (verticale apparente) et assiette réelle

L'assiette "perçue" et l'assiette réelle restent approximativement parallèles jusqu'au moment où l'avion commence à redescendre. Les deux courbes divergent ensuite franchement avec l'augmentation de l'accélération longitudinale.

Lorsque l'assiette réelle approche -9° , l'assiette perçue est d'environ $+13^\circ$.

Ces courbes montrent à quel point une accélération longitudinale significative lors d'une mise en palier de nuit, sans horizon extérieur, peut "gommer" des échappées d'assiette très importantes.

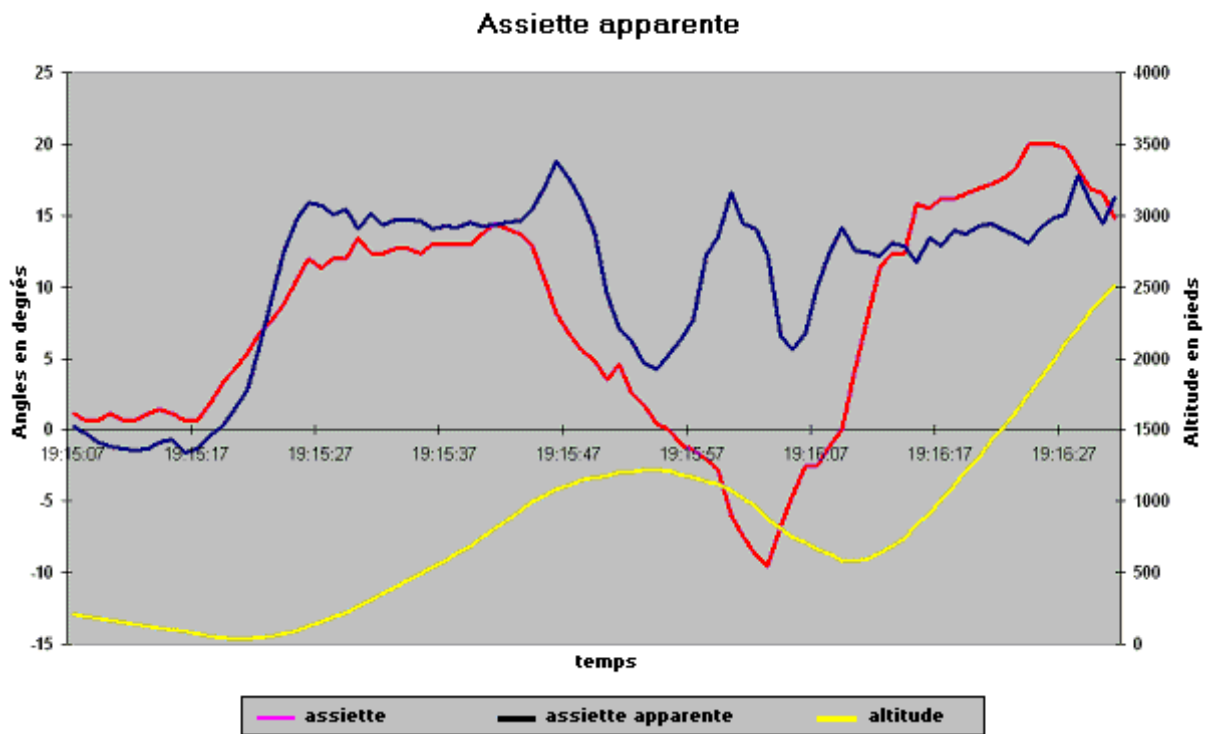


Figure 8 : Evolution de l'assiette apparente

5.3.2 – Analyse

Cette analyse est celle de la thèse

1 – Choix de séquences

Elles sont extraites en grande partie du compte-rendu de la compagnie. Les durées des séquences sont vraies à +/- 1sec. L'origine 0 est prise à l'évènement déclencheur.

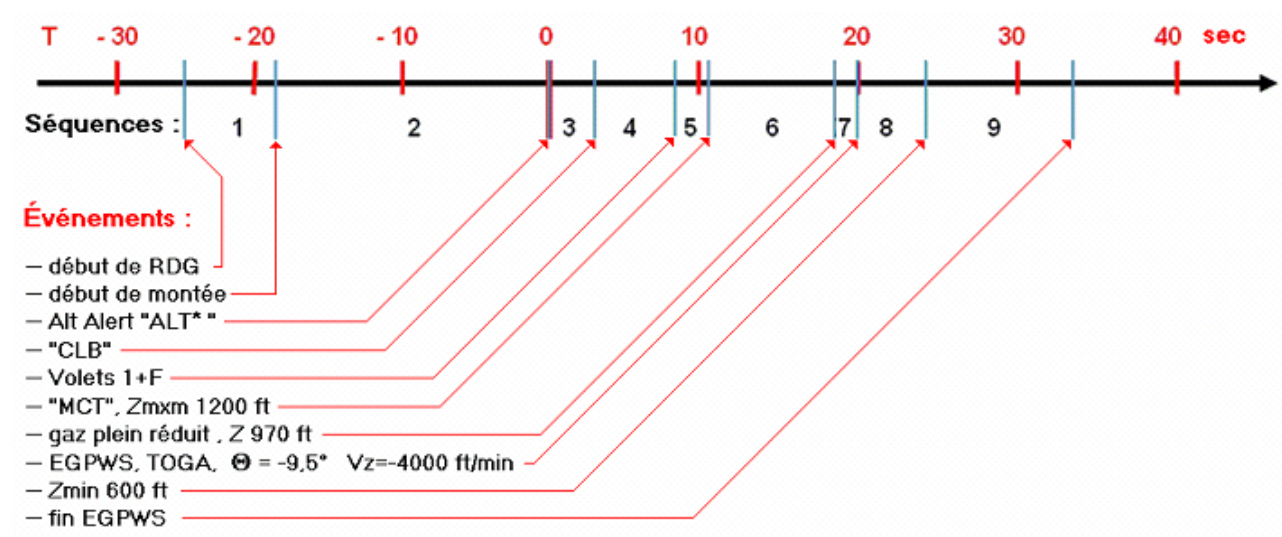


Figure 9 : Séquencement du cas n°1

2 – Analyse chronologique des séquences

Se reporter au Chapitre 2 pour la description des instruments de vol, pour le PFD en particulier.

Les parties D des séquences 1 à 9 ont été proposées à la cotation des experts (voir 7.1.5).

Séquence 0 : fin de l'approche

A– description de la situation :

Le commandant de bord Cdb reconnaît le problème de vent arrière (un trop fort vent arrière augmente la distance d'atterrissage) et décide une remise de gaz, RDG.

B – action normale souhaitée :

La RDG est normale

C – action effectuée :

Correcte

D – actions cognitives élémentaires :

Sans objet

Séquence 1 : Remise de gaz (RDG) (7 sec)

A – description de la situation :

RDG dans l'axe de la piste avec l'intention de faire une approche sur l'axe inverse de la piste (au cap inverse, après virage de 180°). Visibilité extérieure correcte de la piste au début, puis nuit et obscurité au cours de la poursuite au-dessus de la mer.

B – action normale souhaitée :

Il s'agit d'interrompre la descente et de remonter pour effectuer une nouvelle approche. Par le PF (Cdb) application de la poussée maximale des moteurs, TOGA (Take-Off & Go-Around) avec la main droite. Ordre à cabrer sur le manche avec la main gauche de façon à afficher l'assiette longitudinale Θ sur la barre horizontale du FD (directeur de vol) sur l'instrument PFD (Primary Flight Display) et stabilisation de cette assiette Θ .

Le fait d'avoir placé les leviers de poussée sur le cran TOGA a déclenché un mouvement vers le haut de la barre horizontale du FD donnant une assiette Θ permettant au pilote de stabiliser en montée une vitesse constante autorisant une pente optimale de montée.

Dans la famille des avions Airbus, à partir de l'A320, les leviers de commande de poussée des moteurs se placent sur des crans permettant la sélection immédiate de la poussée :

- TOGA pour le décollage et la RDG
- MCT pour une poussée maximale sans limitation de temps
- CLB pour la poussée requise par une montée et pour toute poussée requise par les sélections automatiques de vitesse, ce qui est la procédure normale d'utilisation.

Dans ce dernier cas l'évolution de la poussée est indépendante de la position des leviers.

Cependant, si aucune vitesse n'a été sélectionnée via les automatismes, la commande directe des moteurs (de la poussée) est possible pour les pilotes s'ils quittent le cran CLB en faisant bouger les leviers entre ce cran et la position plein réduit. Ils peuvent alors ajuster manuellement la poussée à leur choix en fonction de la position des leviers.

Simultanément annonce de la remise de gaz RDG par le PF et demande de rentrée des volets sur la position 3.

Immédiatement et successivement retrait des volets de la position 4 « FULL » vers la position 3 (réduction de la traînée) et rentrée du train (LG, Landing Gear) par le PNF (copilote). Annonce de la RDG à la tour de contrôle (ATC) par le copilote PNF.

C – action effectuée :

Correcte.

D – actions cognitives élémentaires :

Pour le **PF** :

- **AP1** : l'objectif est de remonter dans l'axe vers l'altitude de fin de RDG, sélectionnée par le PNF (*dont la valeur de 1 700 ft est affichée en attente par le PNF sur l'échelle des altitudes de l'indicateur Primary flight display PFD, valeur erronée suite à une mauvaise lecture d'une présentation ambiguë de l'altitude de RDG sur la carte d'approche en réalité de 2200 ft*). Passage de la manœuvre à AG1.

- **AG1** : pilotage manuel. Balayage visuel sur le PFD, commun entre ses différentes fonctions cognitives FC utilisées.

AG1 utilise simultanément 2 fonctions cognitives FC différentes, l'une en tangage dans le plan vertical et l'autre en cap dans le plan horizontal ; cela est dû au fait que les humains se déplacent de façon différente dans ces 2 plans et que le vol amplifie ce phénomène, à tel point que la formation des pilotes a formalisé cette discrimination, ainsi que la structure de la conduite des aéronefs avec schématiquement les commandes de vol en tangage pour les évolutions dans le plan vertical et celles en roulis et direction pour les évolutions dans le plan horizontal.

- **FC1 : pilotage manuel en tangage** (plan vertical) : action en tangage sur le manche pour amorcer la montée, combinée avec, sur l'horizon artificiel (HA), l'interception de la barre horizontale du directeur de vol FD par le centre de la maquette. Utilisation du modèle mental MM requis en boucle fermée BF. Balayage visuel sur le PFD entre le HA et les échelles de vitesse VC et d'altitude Z pour contrôler les évolutions correctes des VC et Z.

- **FC2 : pilotage manuel en cap** (plan horizontal) : action en roulis pour conserver les ailes horizontales avec le centre de la maquette sur la barre verticale du FD pour rester sur le cap actuel (action en boucle fermée BF). Il est possible que l'échelle de cap au bas du PFD n'ait pas été consultée.

- **AG5** : communication interne : annonce de RDG au PNF avec demande de rétraction des volets d'un cran (de 4 vers 3).

Bien que non précisé dans le rapport ceci est la procédure normale et la suite du vol prouve que les actions ont été effectuées.

La permutation entre les parties délibérées conscientes de l'exploitation des paramètres lus au cours du balayage visuel des fonctions FC1 et FC2 et le passage au 2^{ème} plan en mise en action réflexe [automatique] des mêmes paramètres lors de cette permutation (voir Chapitre 3), s'effectue pendant la durée de rémanence sur la mémoire court terme Mct, avec

cependant plus de temps alloué à la fonction FC1 en charge de l'objectif primaire qui est la remontée.

Action consciente simultanée de AG5, communication avec le PNF, d'après la possibilité d'actions conscientes simultanées des 2 modalités visuelle et verbale.

- **AG2** : observation visuelle extérieure : sans objet car nuit sur la mer.

Pour le **PNF** :

positionne les volets sur 3, rentre le train, annonce la RDG à la tour de contrôle, et les positions du train et des volets au PF (remarque id° AG5).

Séquence 2 : montée (18 sec)

A– description de la situation :

Le directeur de vol FD indique une assiette Θ correspondant à la meilleure VC de montée, qu'il faut stabiliser jusqu'à l'interception de l'altitude sélectionnée. Le cap est constant. Obscurité totale sur la mer.

B – action normale souhaitée :

Le PF doit stabiliser Θ sur la barre du FD et vérifier la bonne concordance avec les paramètres VC, Z et Vz.

Le PNF vérifie l'ensemble des paramètres.

C – action effectuée :

Correcte.

D – actions cognitives élémentaires :

Idem séquence 2.

Séquence 3 : début d'interception d'altitude (3 sec)

A – description de la situation :

L'alerte sonore « Altitude alert » d'approche de l'altitude sélectionnée retentit.

Action normale. Cette alarme uniquement sonore a pour objet d'avertir les pilotes qu'ils s'approchent de l'altitude sélectionnée afin qu'ils débutent son interception en avance de phase ; elle survient comme rappel 750 ft avant l'altitude sélectionnée sur le FCU. Mais elle survient aussi à titre de rappel lorsqu'on a dépassé par inattention ou maladresse l'altitude sélectionnée.

Cependant l'altitude sélectionnée n'est que 1.700 ft au lieu de 2.200 ft suite à la lecture erronée d'une information ambiguë de la carte du terrain. La vitesse verticale Vz est élevée (avion léger). L'interception de l'altitude par le directeur de vol FD s'effectue avec l'apparition de l'indication ALT* sur le PFD, sur le bandeau Flight management annunciator FMA d'indication des modes automatiques.

Cette indication visuelle ALT s'inscrit sur le FMA du PFD conformément à l'indication des interventions des modes automatiques du système de pilotage ; elle signifie que le FD a débuté le mode d'interception automatique de l'altitude sélectionnée et sa barre horizontale s'abaisse pour donner l'ordre au pilote de commencer à diminuer l'assiette Θ ; elle est indépendante du mode « Altitude alert » qui n'est qu'un rappel et non un ordre.*

Simultanément, lors de l'enclenchement de l'interception d'altitude (donc avec l'apparition de ALT), il y a apparition de l'indication « LVR CLB » sur la partie FMA du PFD, signifiant qu'il est nécessaire de placer les leviers de poussée sur un cran inférieur à ceux de « TOGA » (Take-off/Go around) ou de « MCT » (Maximum continu) afin de réduire la poussée en – dessous de la poussée maximum. La vitesse objectif est automatiquement avancée vers une valeur repérée G DOT (Green Dot) sur l'échelle des vitesses, supérieure à celle de la limitation de vitesse imposée par la position des volets, dans le but d'accélérer l'avion. Ainsi le positionnement des leviers sur le cran LVR CLB assure une accélération vers la vitesse automatiquement sélectionnée, mais en nécessitant la rentrée des volets.*

Ces indications doivent être lues et rapportées par le PNF. Simultanément la barre du directeur de vol FD bouge vers le bas demandant ainsi au PF de diminuer l'assiette Θ jusqu'à sa valeur de stabilisation de l'altitude. Cette diminution d'assiette sans diminution suffisante de poussée provoque une accélération longitudinale jusqu'à la valeur de vitesse objectif automatiquement sélectionné (G DOT). Cette accélération est vue sur l'échelle des vitesses et quantifiée par le vecteur jaune d'accélération apparaissant sur cette échelle. Les volets étant en position 3, la vitesse VC actuelle, en augmentation, est 10 kt en dessous de la limitation de vitesse VFE, colorée en rouge en haut de la même échelle indiquant la nécessité soit du positionnement des volets sur 2 ou sur 1+F, soit d'une réduction de la poussée afin d'arrêter l'accélération.

Si les leviers de poussée sont dans le cran CLB (LVR CLB) la poussée diminue automatiquement, éventuellement plein ralenti, pour éviter le dépassement de la limitation de vitesse VFE. Cette réduction n'est pas automatique sur la position TOGA ou sur MCT.

D'après le rapport d'incident la pente de montée, l'assiette longitudinale apparente ou verticale apparente, est perçue de façon corporelle par la combinaison de l'accélération de la pesanteur et de la forte accélération longitudinale, comme montré dans le schéma de trajectoire (la partie I encadrée rouge correspond aux séquences 3, 4 et 5, les deux parties I et II repèrent les zones où l'assiette apparente (verticale apparente) perçue est en opposition avec la variation négative de l'assiette Θ de l'avion) :

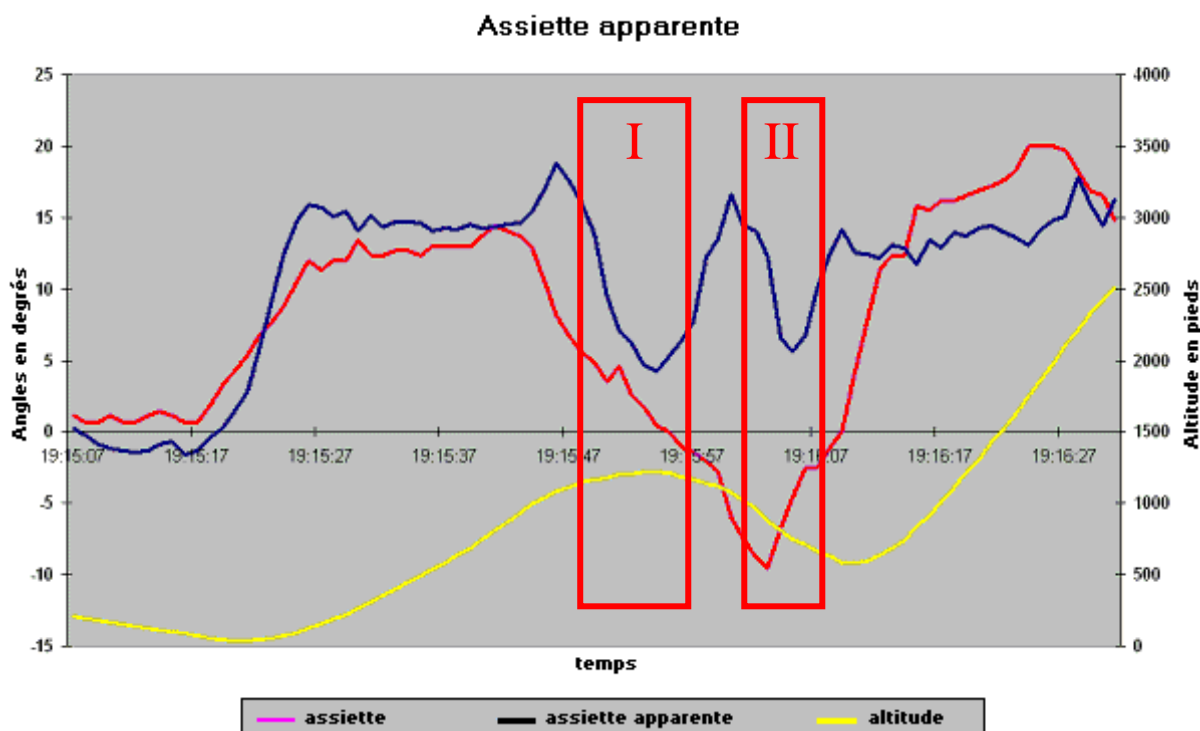


Figure 10 : Périodes d'assiette apparente positive

B – action normale souhaitée :

La manœuvre normale d'interception d'altitude, tirée du modèle mental MM requis extrait de la mémoire long terme Mlt, impose une coordination dans l'exploitation visuelle des informations suivantes : barre horizontale du FD qui est l'information de commande d'action à suivre exactement, ainsi que les autres paramètres dont la surveillance assure la conformité de l'action, c'est-à-dire l'assiette Θ , l'altitude Z avec l'indication de l'altitude cible sélectionnée, la vitesse verticale Vz, la vitesse VC avec l'exploitation de la longueur de la flèche jaune donnant la valeur de l'accélération longitudinale, la poussée EPR des moteurs. Cette coordination est basée sur 2 actions simultanées en boucle fermée (BF) : les actions manuelles, sur le manche et les leviers de poussée, et le balayage visuel sur le PFD, entre le FD, les échelles de Θ , de VC, de Z et de Vz, et sur l'écran ECAM placé au centre et en haut entre les deux panneaux pilotes, avec les indicateurs EPR de poussée. Ce balayage, dans le cas présent, doit être rapide, de l'ordre de la seconde ou moins pour chaque paramètre sans aller au-delà de 3 sec pour une information spécifique car il faut que la partie consciente de la manœuvre et de ses contrôles ne dépasse pas les 10 à 20 sec de capacité de la mémoire court terme Mct tout en exploitant simultanément l'ensemble des paramètres requis.

La mécanique du vol impose que le PF doive donc réduire la poussée et terminer la manœuvre d'interception d'altitude en contrôlant cette dernière sur l'échelle des altitudes Z. Le PNF doit positionner les volets sur 2 ou 1+F à la demande du PF.

C – action effectuée :

Le rapport d'enquête signale que le PF a dit avoir cru, lorsque les alarmes sont survenues, qu'il avait dépassé l'altitude sélectionnée, cependant sans donner la cause de cette erreur. Cet élément donne le départ de l'analyse cognitive.

Il est probable qu'au cours de la séquence précédente l'attention du PF s'était portée sur autre chose que l'objectif d'interception de l'altitude de RDG, sans qu'on puisse déduire des faits ce qu'était cet « autre chose ». Apparemment il regardait les instruments « sans les voir », ou il regardait ailleurs, ou il s'occupait d'autre chose, par exemple de l'examen de la fiche d'approche du terrain concernant la piste nouvellement choisie. Il est rappelé que l'instrument principal est le Primary flight display PFD qui rassemble tous les paramètres nécessaires au pilotage à court terme, sauf les indicateurs de poussée situés sur l'ECAM à 20 cm du PFD. Pendant la séquence précédente le PF regardait forcément le directeur de vol FD puisque l'assiette Θ correcte était stabilisée. Cependant s'il avait porté attention à l'évolution du vol il y aurait inmanquablement noté que l'altitude d'alors était inférieure à l'altitude sélectionnée quelle qu'elle soit. Aussi la simultanéité de l'alerte sonore « Altitude alert » accompagnée de l'annonce déduite du rapport de ALT* (« alt star ») par le PNF est un réveil brutal sur une situation nouvelle et inattendue. Ce qui suit est une hypothèse possible, bien que surprenante, tirée des dires du PF, de la suite des événements observés, de la mécanique du vol et de l'affichage des instruments de vol. Il est bien évident que son comportement ne correspond à aucun critère opérationnellement logique.

Cette situation est analysée immédiatement par le PF sous l'intuition qu'il avait manqué une séquence ou des informations, avec l'exploitation apparente (logique dans l'erreur causée par cette intuition) de seulement 4 éléments parmi toutes les informations disponibles et claires concentrées sur le PFD :

- l'assiette longitudinale Θ est élevée et la vitesse verticale V_z est grande (vrai) ;
- (?) ALT* signifie que l'altitude sélectionnée a été dépassée sans qu'on en ait eu conscience (faux) ;
- (?) en conséquence l'alerte sonore « Altitude alert » signifie qu'elle a été dépassée pour la raison d'une vitesse verticale V_z élevée (faux) ;
- la barre horizontale du FD commande une diminution importante de Θ (vrai), donc l'altitude a bien été dépassée (faux).

La combinaison de l'altitude trop basse et de la vitesse verticale V_z élevée a entraîné une demande d'interception d'altitude rapide et soudaine (imprévue d'après la fausse intuition) se traduisant sur le PFD par le mouvement vers le bas de la barre horizontale du FD (l'ordre de diminuer l'assiette Θ). Bien que les ordres transmis par le manche n'aient pas pu être restitués il est probable que le PF pensait que l'altitude de stabilisation avait été dépassée et qu'il fallait donc suivre les ordres du FD pour descendre afin d'intercepter l'altitude manquée. Si le PF n'a pas instantanément réagi, le court délai de surprise est suffisant pour que la barre horizontale du FD aille vers sa position la plus basse pour l'interception, ce qui provoque une réaction d'amplitude plus élevée que normale sur le manche en réduction de Θ . L'intuition d'avoir dépassé l'altitude devient alors une certitude et le PF peut juger inutile de vérifier exactement l'altitude, ce qui est confirmé par le fait que l'altitude réelle varie de façon inappropriée par rapport à la situation donnée par l'ensemble des paramètres de vol, alors que l'altitude sélectionnée se trouve portée en haut de l'échelle des Z et non en bas si elle avait été dépassée.

Cette forte diminution d'assiette provoque une augmentation rapide de vitesse, 10 kt en dessous de la VFE volets 3 au départ de la manœuvre, alors que le bandeau de limitation de vitesse est déjà apparent.

Le balayage visuel est ralenti par l'action d'analyse de situation altérée par la surprise et par le faux diagnostic.

A partir de ce moment la barre du FD et surtout l'échelle des vitesses VC deviennent les informations majeures pour le PF ce que tend à montrer l'évolution enregistrée du vol.

Le PF place les leviers de poussée sur le cran CLB (Climb) suivant la procédure normale, ce qui diminue un peu la poussée mais la vitesse automatiquement sélectionnée G DOT est bien supérieure à la vitesse actuelle.

On ne voit pas comment la prise en compte consciente de l'altitude pourrait mener au scénario réel observé.

D – actions cognitives élémentaires :

Pour le **PF** :

- **AP1** : la simultanéité de l'alerte sonore « Altitude alert » et de l'indication ALT*, accompagnées par le brusque mouvement du directeur de vol FD en diminution de l'assiette Θ ont créé un état de surprise ayant provoqué la recherche d'un diagnostic de situation. La décision dictée par l'intuition fautive d'avoir manqué le passage par l'altitude sélectionnée a été de débiter l'interception d'altitude par le haut (altitude de départ plus élevée que celle sélectionnée) et non par le bas (altitude plus basse que celle sélectionnée, comme la situation réelle le dicterait) comme premier objectif avec l'agent AG1.
- **AP2** : le fait d'avoir simultanément l'indication d'avoir passé l'altitude (mauvaise interprétation de l'ensemble de l'alerte « Altitude Alert » et de l'indication ALT*) et celle de l'avoir beaucoup dépassée (mauvaise interprétation de « Altitude alert ») reste une préoccupation forte et paraissant limiter la capacité mentale consciente comme le prouve la suite des actions : stress provenant de cette séquence manquée ?
- **AG1** : en vision de la barre du FD sur sa position basse :

La figure ci-dessous du PFD n'est pas conforme à la situation décrite mais elle montre clairement comment les présentations des paramètres primordiaux sont très proches les unes des autres : vitesse VC à gauche avec vecteur jaune d'accélération, assiette longitudinale et horizon (délimitant le ciel bleu et le sol brun) au centre avec en surimpression les barres perpendiculaires vertes du Directeur de vol, altitude et vitesse verticale, présentées à droite ici en montée. Ce qui rend le comportement du PF difficilement compréhensible.

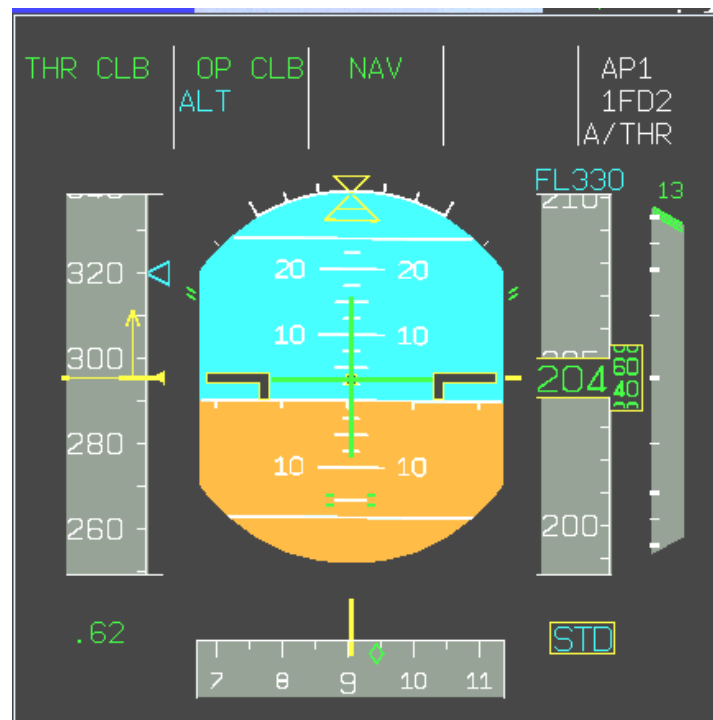


Figure 11 : Exemple de figuration sur PFD

- **FC1 : pilotage en tangage** : utilisation du modèle mental MM d'interception d'altitude extrait de la mémoire long terme MLT.

Cette FC est intéressante.

- Elle peut être prise en compte entièrement par les automatismes de bord lorsque la fonction « interception d'altitude » est sélectionnée avec la configuration suivante : pilote automatique (AP) enclenché, altitude de stabilisation sélectionnée, poussée automatique (ATHR) enclenchée, leviers de poussée sur le cran CLB (climb), vitesse de stabilisation en palier sélectionnée. Dans ce cas les équations correspondantes de la mécanique du vol sont « mécaniquement » résolues en mode continu par les équipements de l'avion.

- Elle peut n'être que partiellement prise en compte par les automatismes, avec une intervention limitée du pilote humain. C'est le suivi de la même fonction avec la même configuration, sauf que le pilote automatique n'est pas enclenché mais que le directeur de vol FD l'est. Dans ce cas le FD reçoit les mêmes ordres que recevrait l'AP, et les transmet via le PFD au pilote. Ce dernier assure donc en boucle fermée BF les mêmes fonctions que l'AP avec le transfert et le traitement des informations visuelles d'ordres aux pressions sur le manche (les mouvements du manche découlent des pressions qui sont les sensations quantitatives utilisés par les pilotes : résultat expérimental), lequel commande les mouvements de l'avion, ce qui ferme la boucle d'asservissement. On voit donc la nécessité de bien suivre les indications du FD, le pilote n'étant plus qu'un élément dans la résolution des équations de la mécanique du vol.

- Elle peut être entièrement prise en compte manuellement par le pilote. Dans ce cas elle utilise un modèle mental MM permettant au pilote de résoudre directement les équations par combinaison (1) des perceptions visuelles des paramètres clés du PFD, Θ , VC et sa flèche de tendance, Z et sa Vz, (2) des sensations manuelles de pression sur le manche, (3) des

perceptions manuelles de position des leviers de poussée, (4) des informations visuelles de poussée (EPR) données par l'ECAM, (5) le tout utilisé en boucles fermées BF d'asservissement. L'objectif est de stabiliser une vitesse VC sélectionnée à une altitude stabilisée sélectionnée. Cette procédure est utilisée depuis l'origine de l'aviation et enseignée comme basique en école de pilotage. Quel est le modèle MM correspondant ? Ce qui suit est le résultat d'années d'observation de centaines de pilotes, le plus souvent en formation.

De façon résumée la vitesse VC et sa variation (flèche jaune de tendance) sont surtout dépendantes de la poussée et de l'assiette Θ ; la vitesse verticale Vz est surtout dépendante de Θ et de la poussée ; Vz donne une bonne indication qualitative d'une approche stabilisée de l'altitude visée Z. Et l'ensemble de ces 6 paramètres est lié par la mécanique du vol. Il faut donc les traiter simultanément, avec les actions manuelles en découplant, dosées sur le manche et les leviers de poussée, en boucles fermées.

Les localisations visuelles sont sur le PFD : l'échelle des vitesses VC, celle de Θ sur l'horizon artificiel, l'échelle des Z et l'indication de Vz qui y est accolée ; sur l'ECAM, à environ 20 cm du PFD, se trouvent les cadrans d'EPR (poussée). Les informations du PFD sont utilisées à deux fins : vérification des résultats des actions lancées et prise en compte des nouvelles indications pour lancer les suivantes. Le canal visuel étant unique le balayage visuel entre tous les paramètres du PFD et ceux de l'ECAM est permanent. En fait la consultation des paramètres de poussée est moins fréquente que celle des paramètres du PFD car les ajustements normaux de poussée ont des répercussions relativement plus lentes que les autres (sauf s'ils sont de grande amplitude, ce qui n'est pas nécessaire si la manœuvre est conduite de façon continue).

Deux caractéristiques particulières de cette fonction cognitive FC sont à noter :

- la manœuvre correcte nécessite son « calcul », se jouant sur la mémoire court terme Mct car elle est rapide et continue, d'après l'ensemble des perceptions visuelles et tactiles. Bien qu'elle soit apprise et stockée en mémoire, son modèle mental MM ne peut être qu'un « schéma » car chaque nouvelle interception d'altitude possède ses particularités. Il oblige la fonction FC qui l'utilise à « essayer » de façon probabiliste des « dosages » d'actions de commande en fonction de la meilleure analyse des paramètres lus et utilisés en confrontation avec les expériences passées, et à rajuster ces actions en fonction des résultats observés.

- ce calcul oblige à des ajustements constants des actions à lancer d'après les résultats observés, donc à une lecture consciente des paramètres clés puisqu'il s'agit d'actions en boucle fermée. La fonction FC utilise donc son modèle MM de façon opportuniste en décidant la captation de la valeur du paramètre lui paraissant le plus pertinent pour l'ajustement décidé dans la manœuvre globale, avec un balayage visuel répondant à cet opportunisme. Ainsi la partie consciente de la FC est partagée sur la Mct en séquences rapides de traitements des 6 paramètres visuels, laissant successivement chacun d'eux en « automatique » sur la Mct lorsque le balayage passe sur un autre. On peut donc avoir au sein de la même fonction FC des parties pouvant passer en automatique alors que l'ensemble de la FC fonctionne apparemment de façon consciente.

Action manuelle sur le manche d'amplitude importante pour rattraper la barre horizontale du directeur de vol FD.

Balayage visuel du PFD : il s'effectue entre la partie centrale (l'horizon artificiel et la barre du FD) et l'échelle de VC, l'altitude Z ayant été probablement observée en vision périphérique en tant que variant en montée rapide. Mais l'accélération longitudinale rapide amenant VC

vers sa limitation de vitesse VFE volets sur 3 amène à considérer l'échelle des VC comme information immédiatement primordiale dont l'exploitation nécessite une réduction de poussée.

En conséquence les leviers de poussée placés sur le cran CLB devraient initier la réduction de vitesse, mais malheureusement cette action est insuffisante du fait de la valeur élevée de la vitesse objectif automatiquement sélectionné, donc l'accélération se poursuit jusqu'à la limite VFE avec probablement un dépassement temporaire. Le modèle MM associé au fonctionnement des sélections de modes de poussée par les leviers et les automatismes n'est pas exploité, car après la manœuvre sur CLB l'absence d'action sur les leviers de poussée montre que la gestion de la poussée passe en boucle ouverte BO, la partie consciente de AG1 étant orientée sur l'observation de l'échelle de vitesse. Cette incohérence apparente est prise en compte par AP1.

- **FC2 : pilotage en cap** : l'assiette latérale étant maintenue nulle, le cap n'évolue pas. La surveillance du cap est donc inutile, d'autant plus qu'une variation de quelques degrés est sans importance.

- **AG5** : pas d'information.

Pour le **PNF** : Il a probablement annoncé les informations ALT* et LVR CLB lues sur la partie supérieure du PFD (FMA, indication des modes automatiques du FD et de la poussée).

Séquence 4 : poursuite de la diminution d'assiette Θ (5 sec)

A – description de la situation :

La diminution de l'assiette Θ est rapide et sa commande pilotée reste à la diminution. La variation d'altitude diminue mais vers une altitude de stabilisation bien inférieure aux 1700 ft sélectionnés.

La poussée n'ayant pas fortement diminué, l'accélération longitudinale reste importante et malgré la diminution de la pente de montée la composante longitudinale d'accélération donne une impression de montée continue.

La barre horizontale du directeur de vol FD est passée de la position basse à la position haute, demandant ainsi une reprise de la montée vers l'altitude sélectionnée.

Le PF continue de commander une diminution de Θ .

La vitesse VC atteignant sa limite VFE volets en position 3, le PF demande le positionnement directement sur 1 (ou exactement 1+F ce qui est équivalent, c'est-à-dire volets en position 1 et bords de bord d'attaque sortis) exécuté par le PNF.

Notez que la fonction automatique de poussée réduit la poussée à l'atteinte de VFE, probablement vers le plein réduit compte tenu de la forte diminution de Vz.

B– action normale souhaitée :

Le positionnement des volets sur 1 (1+F) est correct.

La reprise du contrôle de la situation aurait imposé simultanément le suivi en Θ de la barre du FD pour continuer la montée interrompue, et la réduction de la poussée, c'est-à-dire en

plaçant les leviers en arrière du cran CLB de façon à ajuster la vitesse VC ou en sélectionnant une vitesse inférieure à G DOT au panneau de sélection FCU.

C – action effectuée :

Le balayage visuel privilégie l'échelle de vitesse VC avec une certaine focalisation de l'attention. Ainsi le passage de la barre du FD de la position basse à la position haute (pour indiquer la nécessité de reprendre la montée) est soit passé inaperçu, même en vision périphérique, soit considéré incompréhensible compte tenu du faux diagnostic du dépassement de l'altitude sélectionnée. Si l'échelle d'altitude Z est visionnée ce n'est que de façon fugitive en ne retenant que sa variation encore vers la montée.

Le retrait direct des volets vers 1 (1+F) est correct.

D – actions cognitives élémentaires :

Pour le **PF** :

- **AP1** : Trois hypothèses.

Les 2 premières sont celles du rédacteur.

1 - La durée importante de l'arrêt du balayage visuel sur l'échelle de vitesse VC n'a pas permis d'observer le passage vers le haut de la barre du directeur de vol FD. L'analyse de la situation est donc confuse car non conforme au modèle clé, le modèle MM normal : un regard vers l'horizon artificiel HA ne permet pas de retrouver la barre du FD où elle était située d'après la mémoire court terme Mct (elle est désormais en haut et non en bas).

2 - Ou la barre est bien vue en position haute mais on n'en tient pas compte car cela n'est pas conforme au diagnostic.

Cependant cette incohérence est perçue par AP2 et se traduit par une préoccupation diminuant la capacité de traitement conscient de la situation.

Dans les 2 cas on n'enregistre pas que l'assiette Θ diminue fortement ; les variations de vitesse soumises aux effets inverses de la réduction automatique de poussée à l'arrivée sur la limitation VFE et à la forte diminution de vitesse verticale Vz sont difficilement analysables ; l'analyse tronquée des informations visuelles ne menant à aucun diagnostic cohérent on s'en remet « en dernier ressort » aux (fausses) informations corporelles montrant qu'on est toujours en montée. Cependant aucun balayage visuel conscient vers l'échelle des altitudes Z n'est commandé (car l'évidence s'imposerait), probablement par focalisation sur l'échelle de vitesse.

Finalement ce dernier diagnostic est retenu : on est encore en montée.

Les variations d'assiette sont très importantes, ce qui semble montrer une mauvaise formation initiale (sous l'effet du stress, on revient aux comportements initiaux même si on les a corrigés par la suite).

- **AG1** : l'objectif majeur devient le contrôle de la vitesse, tout en continuant de diminuer la pente.

En revanche le pilotage en tangage a pour objectif de réduire l'assiette apparente en ignorant le directeur de vol FD et l'assiette réelle.

En mécanique du vol les variations de vitesse dépendent de plusieurs paramètres :

- *la poussée,*
 - *la traînée aérodynamique,*
 - *la pente de la trajectoire (dont la vitesse verticale V_z est le reflet).*
- Visiblement le PF a oublié ce dernier paramètre.*

- FC1 : pilotage en tangage : double objectif.

La perte apparente du FD et/ou la fausse incohérence observée amènent le désintérêt pour l'horizon, et on exploite l'impression corporelle de pente continue de montée. D'où la commande persistante de diminution de Θ , le pilotage en tangage ayant pour objectif de réduire l'assiette apparente. En revanche l'arrivée rapide sur la visible limitation de vitesse VFE déclenche une focalisation visuelle sur l'échelle de VC et la demande correcte de diminution rapide du braquage des volets. La vision périphérique n'est plus exploitée. Le partage de l'attention ne fonctionne plus. L'échelle d'altitude Z est ignorée en mode conscient.

3 – Cette hypothèse est proposée par deux experts de façon non concertée.

Il y a toujours focalisation sur l'échelle de vitesse mais le bandeau rouge et noir de limitation des vitesses VFE (lié à la position des volets) apparaissant au sommet de cette échelle quand la vitesse augmente pourrait être interprété alors comme une injonction à diminuer l'altitude qu'on pense avoir dépassé, ou à diminuer l'assiette ce qui va dans le même sens. Ainsi il y aurait transposition de l'idée de ces diminutions sur celle de diminution de la vitesse sur la même échelle, celle des vitesses, mais en gérant le tout non avec une commande de vitesse (leviers de poussée) mais avec le manche commandant la diminution d'assiette/altitude. Cela signifierait qu'il y aurait mélange d'interprétation des perceptions visuelles avec un modèle mental MM altéré par une erreur d'assimilation de la présentation de la limitation en position haute de la vitesse VFE à une altitude ou à une assiette à décroître impérativement. Ce serait une perte de conscience de situation (avec une présentation très ergonomique normalement sans ambiguïté sur le PFD) par mélange erroné d'interprétation des perceptions visuelles sous stress, plaçant sur l'échelle de vitesse l'exigence intuitive fausse de diminution d'altitude, qui se substituerait à l'échelle d'altitude.

- AG1 : l'objectif majeur devient le contrôle d'une « diminution » (de la vitesse, de l'altitude, de l'assiette, de leur mélange ?).

Le pilotage en tangage a pour objectif de réduire à la fois la vitesse et l'altitude sur la même échelle des vitesses, par action sur le manche, ce qui crée une confusion inévitable car vitesse et assiette/altitude varient en sens inverse. On ignore l'assiette réelle Θ en ignorant le directeur de vol FD et l'horizon immédiatement à côté.

- la **FC1, pilotage en tangage**, n'utilisant que les informations de l'échelle des vitesses avec un modèle mental MM restreint à la correspondance position du manche/ assiette longitudinale est forcément incohérente et inadaptée.

- FC2 : pilotage en cap : Le cap n'est pas surveillé.

-AP2 : la recherche d'une cohérence prend la presque totalité de l'attention mentale et ne laisse pas de place à une recherche de solution sur la mémoire court terme Mct.

- **AG5** : demande de la position 1 (1+F) au PNF.

Pour le **PNF** : positionnement des volets et annonce au PF.

Séquence 5 : confusion (3 sec)

A – description de la situation :

La variation en montée de l'altitude diminue et cette dernière passe par son maximum de 1 220 ft. L'assiette Θ passe par 0 sans qu'on s'en aperçoive. Malgré cela la poussée est augmentée vers le maximum continu (cran FLEX/MCT). Il y a apparition du message « LVR CLB » clignotant sur le FMA du PFD pour rappeler que les leviers doivent être positionnés sur une poussée moindre. Ce message doit être lu et rappelé au PF par le PNF (l'est-il ? on n'a pas l'enregistrement des conversations).

La vitesse continue d'augmenter, mais la limitation de VC est repoussée vers celle de la configuration 1 (1+F) des volets, le bandeau rouge disparaissant.

B – action normale souhaitée :

Les manœuvres souhaitées sont celles de la séquence précédente.

C – action effectuée :

La focalisation sur l'indication de vitesse, mal interprétée, a éliminé tout autre élément de la mémoire à court terme Mct (*ne pas confondre avec la poussée MCT, Maximum continue thrust*). Il y a saturation de la partie consciente (stress ?) qui, d'après les actions observées, ne propose aucune action pertinente. Le balayage visuel conscient ne semble pas fonctionner. Le mouvement des leviers de poussée en augmentation aberrante de poussée est un signe de cette confusion.

Il pourrait être provoqué en réaction soit à l'observation d'une variation de la vitesse en diminution lors de la réduction automatique de poussée au passage de VFE (volet sur 3), soit à la conscience des moteurs sur ralenti pour la même raison.

D– actions cognitives élémentaires :

Pour le **PF** :

- **AP2** : perçoit une incohérence de la situation sans en donner d'explication.

- **AP1** : admet l'incohérence mais est incapable d'exploiter les perceptions ni de récupérer dans la mémoire long terme Mlt un modèle MM adapté, ni d'en concevoir un nouveau (stress ?). La focalisation sur l'échelle des vitesses a éliminé les autres informations de la mémoire court terme Mct. Le passage des leviers de poussée sur le cran FLEX/MCT est un geste automatique, dicté par une observation, soit de la vitesse, soit du ralenti des moteurs, mais déconnectée du contexte réel.

Cependant la disparition du bandeau rouge et noir de limitation de vitesse VFE par le nouveau positionnement des volets sur 1 devrait retirer la tendance mentionnée dans

l'hypothèse 3 de la séquence précédente, à prendre l'échelle des vitesses comme référence à « diminuer ». Ce qui ne semble pas être le cas.

Pour le **PNF** : annonce le message « LVR CLB » apparu sur le FMA.

Séquence 6 : essai de récupération (7 sec)

A – description de la situation :

La descente inconsciente est débutée avec une assiette Θ devenant négative. La vitesse augmente et l'accélération longitudinale donne à nouveau une fausse impression de montée (partie II de la figure 10 de trajectoire).

La rentrée des volets a provisoirement enlevé la limitation de vitesse.

B – action normale souhaitée :

Les manœuvres souhaitées sont celles des 2 séquences précédentes.

C – action effectuée :

La saturation mentale est installée avec focalisation sur l'échelle de vitesse. Un simple regard sur l'horizon du PFD, à moins de 4 cm, aurait décelé la position immanquable du secteur coloré en brun des assiettes Θ négatives, donc aurait signalé le danger immédiat. Le plus extraordinaire est l'absence de réaction du PNF pendant cette amorce de descente rapide probablement occupé à vérifier les messages de positionnement des volets et à comprendre pourquoi est apparu le message « LVR CLB ».

D – actions cognitives élémentaires :

Pour le **PF** :

- **AP1** : Aucun balayage visuel conscient n'est demandé laissant ainsi la situation se détériorer par manque d'information traitée de façon consciente. Il est important de constater qu'aucune action inconsciente ou automatique de correction de situation n'est activée.

La vitesse augmentant rapidement avec la rentrée automatique des volets au passage de VFE (1+F) cela débloque la conscience qu'il faut la diminuer et surtout, avec réapparition du modèle MM de contrôle de poussée (l'influence de la pente est toujours ignorée), qu'il y a urgence à réduire à fond les leviers de poussée, à les positionner sur « Idle » (plein réduit).

Séquence 7 : début de réduction de vitesse (2 sec)

A – description de la situation :

La poussée est finalement réduite, mais sans que la descente soit arrêtée. L'altitude est de 970 ft en diminution.

B – action normale souhaitée :

Il serait nécessaire d'accompagner cette réduction d'une ressource immédiate pour arrêter la descente et regagner de l'altitude.

C – action effectuée :

Pour le **PF** : les ressources mentales conscientes fonctionnent en s'accommodant des incohérences de la situation et sans abandonner le faux diagnostic initial, par effet tunnel sur cette erreur et sans pouvoir l'abandonner alors qu'il suffirait de quitter visuellement de quelques cm l'échelle de vitesse, sur laquelle il y a focalisation avec le champ de vision focal de 3° (c'est-à-dire sur le PFD un cercle de 3 cm de diamètre) avec exclusion des perceptions périphériques, pour immédiatement avoir tous les éléments cohérents de la situation, surtout la position très inhabituelle du secteur coloré d'assiettes Θ négatives de l'horizon montrant un trajectoire très rapidement descendante.

Pour le **PNF** : ses tâches de surveillance des messages du PFD, de maniement des volets et des rapports qui y sont rattachés ne lui ont pas fait suivre les péripéties du vol (tout cela n'a duré que 20 sec), mais la vue de l'emballlement du PFD l'alerte.

Par vision périphérique ou directe, il voit (d'après le rapport) sur la droite et au-delà de l'obscurité des lumières de la côte, et perçoit alors la situation anormale et dangereuse de descente. Il réagit et demande fermement au PF de remonter immédiatement.

D – actions cognitives élémentaires :

Voir séquence précédente.

Séquence 8 : ressource (4 sec)

A – description de la situation :

L'alarme EGPWS auditive d'approche rapide du sol résonne en demandant une ressource immédiate. L'altitude est d'environ 800 ft, l'assiette Θ est de $-9,5^\circ$, la vitesse verticale est -4 000 ft/min (la poursuite aurait causé la catastrophe 12 sec plus tard).

Pratiquement en même temps le PNF demande la remontée.

Il n'est pas exclu que ce soit le PNF qui ait initié la ressource.

Le PF met les leviers de poussée sur TOGA et débute la ressource avec un facteur de charge de 1,3 (1,3 fois l'accélération g de la pesanteur).

Cependant la poussée étant forte et la ressource insuffisante, la limitation VFE volets 1+F est dépassée de 10 kt avec l'alarme sonore correspondante.

La hauteur minimum au cours de la ressource est 600 ft.

B – action normale souhaitée :

La manœuvre est correcte mais cependant le facteur de charge est insuffisant, bien qu'assurant une bonne marge avec la mer, car l'accélération longitudinale est encore importante.

C et D – action effectuée et actions cognitives élémentaires :

Pour les deux dernières séquences l'analyse cognitive séparée n'offre pas d'intérêt.

Mais cette séquence est intéressante car pour le PF l'alarme EGPWS associée à la demande ferme du PNF de remonter immédiatement est un événement inattendu associé à un danger immédiat.

Alors que dans les 20 sec précédentes il avait fait un faux diagnostic à la suite d'une fausse intuition, suivi d'un effet tunnel sur l'erreur aggravée par une focalisation, le tout ayant amené la saturation de son mode conscient, cette fois-ci il réagit correctement et immédiatement, utilisant de façon appropriée les bons modèles mentaux MM stockés dans sa mémoire long terme Mlt.

Etait-ce une action mentale automatique ?

Ce type de réaction aux alarmes auditives du système de sécurité EGPWS est enseigné au simulateur de vol et rappelé en séances de recyclage et d'entretien.

En cas d'alerte « Pull up » le pilote est tenu de tirer au maximum sur le manche, les protections automatiques empêchant l'avion d'atteindre des facteurs de charge dangereux pour la structure.

Cependant le fait qu'il ne tire pas suffisamment sur le manche pour avoir le facteur de charge maximum et qu'il laisse ainsi à nouveau « échapper » la vitesse pourrait indiquer que l'initiation de la récupération est plutôt en mode réflexe (appris en formation) pas très conscient.

Autre explication : les pilotes de ligne n'ont pas l'habitude des facteurs de charge importants ce qui expliquerait la résistance « à tirer trop fort ». On a aussi vu qu'il n'est pas exclu que ce soit le PNF qui aurait initié la ressource.

Peut-être l'agent AP2, vigilance et détection d'incohérence du PF, avait-il mis en attente active l'AP1 à toutes fins utiles, ce dernier s'étant immédiatement recalé sur la réalité en utilisant un modèle MM basé sur une action réflexe apprise et stockée en mémoire long terme Mlt?

Séquence 9 : fin de récupération (9 sec)

A – description de la situation :

La ressource est poursuivie avec une augmentation du facteur de charge, à 1,9 jusqu'à l'extinction de l'alarme.

B – action normale souhaitée :

Action correcte.

C et D – action effectuée et actions cognitives élémentaires :

L'alarme sonore de VFE semble avoir définitivement placé le PF en mode d'actions conscientes. L'augmentation du facteur de charge montre qu'il a à nouveau intégré la nécessité de piloter Θ en tangage comme paramètre de contrôle de la vitesse à poussée constante.

Suite du vol

La suite du vol s'est déroulée correctement et sans problème, après cette perte de contrôle d'environ 20 sec. L'équipage a donc récupéré toutes ses facultés opérationnelles.

Cependant les pilotes ont demandé une suspension temporaire de leurs tâches (mise en repos).

5.4 - Résumé des analyses du déroulement des évènements observés dans les cas traités

Les 5 cas sont résumés ci-après. Pour plus de détails consulter l'Annexe 2.

En rouge, nous avons mentionné les éléments déclencheurs du processus de réaction rapide.

Cas 1 : A330 en remise de gaz

Perte de contrôle en remise de gaz difficilement explicable, probablement due à une focalisation de l'attention sur le seul indicateur de vitesse.

Conditions

- Obscurité, sans repère extérieur
- Vol calme
- Remise de gaz normale (forte composante arrière de vent, changement de piste)
- Vitesse verticale Vz importante (avion léger)
- Mauvaise introduction de l'altitude de stabilisation suite à l'ambiguïté d'un document (1700 ft au lieu de 2200 ft)
- Pilotage manuel au directeur de vol FD
- Utilisation des indications du Primary flight display PFD
- *Avertissement sonore « Alt Alert » à l'approche de l'altitude sélectionnée*
- *Indication simultanée sur le PFD de début d'interception d'altitude « ALT* » - problème de simultanéité d'indications de significations différentes*
- Faux diagnostic de situation dans le plan vertical : impression d'avoir raté une séquence et d'avoir dépassé l'altitude visée
- Suivi du FD avec faux diagnostic d'altitude
- Conduite erronée de poussée
- **2 hypothèses possibles :**
 - *interprétation erronée de la cause de variation de vitesse,*
 - *ou interprétation erronée du bandeau de limitation de vitesse avec confusion des échelles d'altitude et de vitesses*
- D'où focalisation sur l'échelle des vitesses et de leurs limitations
- Copilote PNF occupé avec les systèmes (volets)
- Inexploitation du directeur de vol FD et de l'indication évidente de la position de l'horizon sur l'horizon artificiel HA (barre du FD se déplaçant à un endroit incompatible avec ce qu'on en attend) et/ou inobservation d'une séquence importante du FD
- Incompréhension de la situation mais focalisation persistante sur l'échelle des vitesses
- Exploitation erronée des sensations inertielles

- Le PNF ne porte pas suffisamment d'attention aux indications de modes des automatismes sur l'annonceur FMA/PFD (annonces sans perception d'anormalité)
- Engagement en piqué incontrôlé (Θ : $-9,5^\circ$, V_z : -4000 ft/min), effet tunnel sur la seule échelle des vitesses
- Prise de conscience tardive de l'erreur sur la poussée des moteurs
- Reprise de repères extérieurs par le PNF qui réagit
- Réveil par l'alerte du PNF et par l'alarme de proximité du sol de l'EGPWS
- Ressource avec début imparfait
- **Temps de perte de contrôle 20 sec**

Cas 2 : A321 arrêt décollage

Interruption du décollage après la vitesse limite autorisée V1, due à la dérive des tâches hors de celles prescrites, suite à la crainte d'une collision aviaire.

Conditions

- Bonne visibilité
- Piste mouillée
- « Rolling take-off »
- Copilote PF
- Poussée maximum TOGA, accélération rapide (avion léger)
- Oiseaux survolant la piste aperçus après la mise de gaz
- Annonce de contrôle de vitesse « 100 kt » tardive du Commandant de bord Cdb/PNF
- **2 hypothèses possibles :**
 - *inattention passagère,*
 - *ou tolérance fréquente, sans danger immédiat, d'annonce d'un paramètre jugé secondaire*
- *Inquiétude de collision aviaire (élément pré-déclencheur)*
- Annonce « on continue » par copilote, prévue par la procédure normale pour être donnée par le Cdb
- Annonce tardive de la vitesse limite V1 par le Cdb/PNF
- *Quasi simultanément choc sur moteur 2 (vérifié plus tard sans effet majeur)*
- Immédiate réduction de poussée par le Cdb avec annonce « Stop ! » - avance de phase et rapidité avec influence négative sur décision erronée mais positive dans l'action décidée
- Action directe sur les freins annulant l'automatisme de freinage – recours à mémorisation de procédure antérieure
- Puis reprise du freinage maximum
- Fin de freinage sur taxiway en fin de piste après dégagement
- **Temps total de l'évènement 30sec**

Cas 3 : Concorde, approche/atterrissage

Atterrissage dans des conditions extrêmes, dans un phénomène météorologique dangereux alors inconnu, suite à la décision de ne pas utiliser toutes les aides à l'atterrissage, disponibles mais de fiabilité incertaine.

Conditions

- Mission spéciale prioritaire
- Pluie intense, obscurité
- Atmosphère calme
- Pilotage manuel sans directeur de vol FD
- Instrumentation classique par cadrans
- Décision de poursuivre l'approche avec conditions météorologiques aux minima choisis
- Approche aux instruments avec contrôleur au sol GCA ; indications de l'axe radio-électrique ILS de fiabilité incertaine volontairement ignorées par le PF
- Contrôle par le PNF avec ILS de précision inconnue
- *Après un début parfaitement stabilisé, observation de déviations importantes en augmentation de pente de descente – phénomène météo inconnu alors (« down-draft » ou fort courant descendant de l'air, dû à un important cumulo-nimbus)*
- Corrections sans urgence, doutes sur précision du GCA qui est le seul guidage pris comme référence par le PF
- Correspondances des déviations GCA et ILS relevées par PNF
- Vers fin d'approche intervention du PNF pour l'urgence de corrections – nécessité d'une injonction forte
- Radioaltimètre inutilisable avant la piste (variation rapide de hauteur du sol au passage du littoral proche de la piste)
- Correction finale tout juste suffisante pour un toucher sur le début de la piste
- Visibilité réduite à l'altitude de décision, juste suffisante pour apercevoir le balisage d'approche et le début de piste, sans pouvoir estimer la hauteur pour arrondir
- Atterrissage franc
- Phénomène météo inconnu de l'équipage (« down-draft »)
- **Durée du problème 90 sec**

Cas 4 : F/A-18, meeting aérien

Accident en voltige aérienne dû à l'accumulation de deux incidents amenant l'effacement en action consciente d'une séquence de figure aérienne. Manœuvre tardive de détresse n'empêchant pas la collision avec le sol.

Conditions

- Bonnes conditions météo
- Figure de voltige déjà effectuée sans problème
- Utilisation du viseur tête-haute Head-up display HUD
- Enclenchement tardif de la post-combustion des moteurs PC d'où déficit de vitesse en début de vol inversé
- Reflet du soleil sur le HUD dans la montée empêchant l'observation de la variation de la vitesse
- *Vitesse observée au sommet très inférieure à l'objectif ; phénomène dû à la forte incidence amenant la mesure de vitesse hors des limites de validité*
- *D'où 3 problèmes quasi simultanés : reflet sur le HUD, déficit de vitesse, gestion du vol inversé*
- Mise en vol inversé sans problème
- Puis observation d'une vitesse à nouveau correcte sans transition, d'où focalisation sur la vitesse
- Très faible temps disponible pour une analyse de situation
- Mise en descente automatique inconsciente en trajectoire zéro g suivant l'instant de séquençement prévu
- La focalisation inhibe la vision périphérique sur l'horizon (vision du sol)
- Reprise du contrôle conscient après vérification d'une vitesse correcte
- Mais cette reprise, avec l'addition consciente d'une 2^{ème} manœuvre de descente, se fait à un moment où une manœuvre de roulis aurait dû être effectuée mais qui a été ignorée (Baars, 1992).
- **2 hypothèses possibles :**
- *l'action en roulis est escamotée dans le traitement conscient alors qu'une ressource correctement placée en temps est effectuée de façon inconsciente. Mais le roulis n'ayant pas replacé l'avion en vol normal la ressource s'effectue en vol inversé*
- *ou simplement la reprise consciente des séquences s'effectue en addition à la séquence de descente déjà effectuée de façon inconsciente*
 - *Dans les deux cas le résultat est identique : mise en piqué irrécupérable*
- La vision périphérique étant revenue le diagnostic de situation impose une manœuvre de détresse n'empêchant pas la collision avec le sol (avion détruit, pilote sauf)
- **La totalité de la figure a duré 20 sec**

Cas 5 : A310, atterrissage

Accident au roulage d'atterrissage, dû à l'absence de décélération suite à la mise de gaz involontaire et ignorée du moteur gauche. L'entraînement involontaire et non décelé de son levier de poussée est provoqué par l'appui inconscient de la main du pilote au cours de la commande du mouvement du levier adjacent de réversion du

moteur droit. Absence de contrôle normal par le copilote. L'avion sort de la piste sans que l'équipage ait eu conscience de l'origine du problème. Avion détruit. 123 victimes.

Conditions

- Bonne visibilité de nuit
- Léger vent de travers
- Piste mouillée
- Avion avec la réverse gauche précédemment en panne et intentionnellement bloquée avant le vol (procédure classique certifiée)
- Atterrissage sans problème
- Début de freinage normal avec réverse droite activée normalement
- *Puis dérive de l'avion vers la droite (levier de poussée du moteur gauche actionné involontairement par mouvement de la main droite sur le levier adjacent de réverse droite accrochant le levier gauche, du ralenti vers la poussée directe) due à la dissymétrie de poussée*
- Contre énergique par palonnier et freins mais la dérive ne s'annule pas alors que la poussée à gauche augmente
- Pas de réaction du PNF
- Retrait de la réverse droite et persistance de la dérive alors que l'avion accélère
- Oscillation pilotée en cap en essayant difficilement de contrer la dissymétrie
- Apparition d'une alarme prévue dans un décollage « Take-off configuration », due à la position avancée non détectée du levier gauche, hors contexte dans un atterrissage, donc paraissant « intempestive » et ignorée
- Tardive conscience d'un problème de vitesse amenant la divergence de l'oscillation par diminution d'attention sur les corrections; cependant l'augmentation de poussée à gauche n'a jamais été perçue
- L'avion sort de la piste et entre en collision avec des obstacles. Avion détruit, 123 morts
- **Durée de la partie roulage au sol environ 30 sec**

6 – UTILISATION DE L'EXPERTISE

6.1 – PRESENTATION

Les références et compétences des experts ainsi que le détail de leurs interventions sont données dans l'Annexe 3.

Ce sont huit navigants, pairs du rédacteur. Deux scientifiques intéressés par la démarche de la thèse ont joint leurs opinions.

On rappelle qu'il avait été demandé d'obtenir l'opinion d'au moins six experts navigants sur les sujets mentionnés en 5.1.5.

L'Annexe 3 étant très détaillée on ne reporte ici qu'un résumé succinct.

6.2 - BILAN DU CHOIX DES SEQUENCES

Nous rappelons que les séquences avaient pour objectif de définir des segments de temps avec des bornes observables sans ambiguïté, et chronologiquement définis afin de raccorder le temps mental intérieur des pilotes au temps physique observé de l'extérieur.

Dans l'ensemble des 5 cas un total de 35 segments a été proposé à la cotation. Dont 33 ont été définis de façon temporelle et 2, dans le cas 3, ne l'ont pas été du fait de l'indétermination temporelle du début et de la fin d'évènement.

La durée additionnée de la totalité des 33 séquences définies de façon temporelle est de 334 sec, soit une durée moyenne de 9,5 sec/séquence. Cependant l'examen détaillé des cas amène plus de précision sur les durées élémentaires.

Pour les cas d'évolution rapide (1, 2 et 4) sur un total de 21 séquences, 11 se situent entre 1 et 5 sec, 7 entre 5 et 10 sec, et 3 entre 10 et 20 sec. Donc avec une majorité en-dessous de 5 sec.

Pour les cas d'évolution plus lente (3 et 5) sur un total de 12 séquences, 2 se situent entre 1 et 5 sec, 4 entre 5 et 10 sec, 3 entre 10 et 20 sec, et 3 entre 20 et 63 sec. Donc avec une tendance marquée à l'étalement entre 5 et 20 sec.

Les segments élémentaires de temps utilisés varient d'un minimum de 1 sec à un maximum de 63 sec.

Les analyses ont montré que les choix étaient convenables et adaptés aux correspondances temporelles recherchées. Aucune remarque n'a été formulée à ce sujet.

6.3 – EXPLOITATION DES COTATIONS

Le tableau suivant résume l'ensemble des cotations des séquences des 5 cas.
Les niveaux de cotation des experts (1), (2), ou (3), sont donnés entre parenthèses.

	Cas n°1	Cas n°2	Cas n°3	Cas n°4	Cas n°5
Séquences à coter	9 séquences	6 séquences	7 séquences	7 séquences	6 séquences
Durée totale analysée	58 sec	45 sec	90 sec	20 sec	56 sec
	Nbre de cotations (niveaux 1à4)	Nbre de cotations (niveaux 1à4)	Nbre de cotations (niveaux 1à4)	Nbre de cotations (niveaux 1à4)	Nbre de cotations (niveaux 1à4)
Expert n°1	9 (1)	6 (1)	7 (1)	6 (1) ; 1 oubliée	7 (1) ; 1 cotée en plus
Expert n°2	5 (1) ; 4 (2)	1 (1) ; 4 (2) ; 1 oubliée	5 (1) ; 2 (2)	pas d'expertise	6 (1)
Expert n°3	non coté, (erreur technique)	3 (1) ; 2 (2) ; 1 (3)	2 (1) ; 5 (2)	6 (1) ; 1 oubliée	4 (1) ; 3 (2) ; 1 cotée en plus
Expert n°4	8 (1) ; 1 (2)	6 (1)	7 (1)	6 (1) ; 1 oubliée	6 (1) ; 1 (2) ; 1 cotée en plus
Expert n°5	non analysé	non analysé	non analysé	analysé sans cotation	non analysé
Expert n°6	9 (1)	6 (1)	7 (1)	7 (1)	6 (1)
Expert n°7	4 (1) ; 5 (2)	3 (1) ; 3 (2)	6 (1) ; 1 (2)	7 (1)	6 (1)
Expert n°8	6 (1) ; 2 (2) ; 1 (3)	6 (1)	non analysé	non analysé	non analysé
Nbre de séquences cotées	54	41	42	31	40
% par niveau de cotation et par cas	76%(1) ; 22%(2) ; 2% (3)	76%(1) ; 22%(2) ; 2% (3)	81%(1) ; 19%(2)	100%(1)	90%(1) ; 10%(1)

	<u>TOTAL</u>
Nbre de séquences présentées	280
Nbre de séquences cotées	208 (74%)
Nbre par niveau	173 (1) ; 33 (2) ; 2 (3)
% par cotation	86% (1) ; 16% (2) ; 1% (3)

Figure 12 : Tableau des cotations d'experts

Tous les experts avaient une grande expérience du vol et de l'observation du comportement opérationnel des pilotes. L'examen du tableau des cotations montre plusieurs éléments intéressants qu'on examine en détail.

- Un taux global d'acceptation de 99%, avec l'ensemble des cotations 1 et 2
- Un taux de cotation « 3 » très faible de non acceptation des analyses (< 1%)
 Il s'agit de l'analyse de 2 séquences sur les 208 cotées, en fait de non acceptation d'hypothèses proposées (cotation 3) et non de rejet (cotation 4):
 - Dans le cas n°2 d'arrêt au décollage la contestation de l'expert n°3 n'est que partielle : il explique le retard à l'annonce de vitesse par la pratique courante d'une tolérance admise dans la vérification de cette vitesse non immédiatement essentielle mais destinée à comparer la cohésion du passage à 100 kt sur les 2 indicateurs des PF et PNF. Cependant bien que l'hypothèse retenue dans la thèse ne soit pas improbable car s'insérant très bien dans le contexte de préoccupation mentale, on retiendra l'objection. Cette contestation vient en renforcement de la nécessité d'avoir l'avis d'experts opérationnels pour tout ce qui touche à l'analyse détaillée du comportement des pilotes.
 - Dans le cas n°1 de perte de contrôle à la remise de gaz l'expert n°8 place son hypothèse en priorité devant celle proposée, renforçant ainsi une hypothèse identique formulée par l'expert n°7 qui cependant considèrerait celle proposée comme plus valable. Elle est importante car pouvant avoir d'importantes répercussions sur la présentation des paramètres de vol et sur la formation des pilotes.

En fait cette cotation 3 reflétait un désaccord sur la probabilité de l'hypothèse retenue, qui restait cependant plausible. Nous avons donc rajouté aux séquences critiquées les

hypothèses exprimées par les experts comme seconde possibilité, ce qui ne remettait pas en cause l'analyse elle-même.

- Les séquences non cotées (26%)

4 causes ont motivé cette absence de cotation :

- 2 par oubli ; il faut noter cependant que 2 séquences non présentées à la cotation ont été cotées spontanément en supplément ;
- 7 pour cause d'absence d'expérience en voltige aérienne de l'expert n°2 (cas n°4) ;
- 9 par doute de l'expert n°3 sur la validité des analyses du cas n°1 comportant des erreurs dans la description des automatismes des systèmes avion ; notez que les experts n°7 et n°8 ont décelé les mêmes erreurs, mais ils n'ont pas jugé qu'elles altéraient les analyses cognitives proposées ;
- 35 pour l'expert n°5 qui n'a pas examiné les cas n°1, 2, 3, et 5 par manque de temps, et qui a analysé le cas n°4 de sa propre manière, classique et sans cotation.
- 20 pour l'expert n°8 par manque de temps (cas n°3, 4, et 5)

- Le taux de 16% de la cotation « 2, Oui mais... »

Malgré parfois des doutes de départ tous, sauf l'expert n°5, ont poursuivi l'examen critique des documents et la cotation des analyses dans la mesure de leur disponibilité. Cependant les comportements observés dans les cas étudiés les ont « interpellés ». Nous reviendrons sur ce point important.

- Le taux de 83% de la cotation « 1 » d'acceptation sans restriction des analyses

Cette valeur élevée est une bonne confirmation de la validité de la méthode choisie dans la thèse.

6.4 - RESUME DES OPINIONS EXPRIMEES PAR LES EXPERTS

Les experts dont il s'agit ici, ceux ayant donné leur avis sur les analyses des 5 cas traités et sur la méthode utilisée, ont une expertise allant au-delà de celle définie en psychologie. Ce sont des super-experts ainsi que définis dans le sous-chapitre « L'expertise » du Chapitre 3.3.3, capables de juger le comportement des autres tout en ayant une haute expertise professionnelle.

6.4.1 - Experts opérationnels

A - De façon générale il y a eu de leur part une surprise initiale à la découverte de la méthode d'analyse proposée à leur jugement. Il leur a fallu s'y adapter, de façon d'autant plus délicate que la succession des cas traités débutait par le plus difficile, le cas n°1. Cependant la méthode a été acceptée ensuite sans réticence, sauf pour l'expert n°5 dont nous rapportons ici l'opinion exprimée, n'excluant cependant pas un accord sur le principe d'une analyse fine du comportement :

« - Le mémoire présenté est une étude du comportement individuel de pilotes confrontés du fait de leur profession, à des situations accidentogènes pour lesquelles ils n'ont pas été préparés ou insuffisamment préparés.

- Tous les pilotes reçoivent au sein d'une même compagnie aérienne la même formation de base, la même instruction professionnelle pratique ; cependant le comportement de chacun d'eux est altéré de façon singulière par un facteur significatif, aléatoire et personnel : le facteur humain.

- La connaissance plus fine du comportement psychologique des pilotes en situations opérationnelles (normales et exceptionnelles) doit permettre d'améliorer de façon significative la sécurité des vols, en développant une méthodologie d'instruction visant à mieux préparer les navigants à réagir aux événements du vol.

- La modélisation du comportement psychologique des pilotes ne peut être traduite par un modèle mathématique unique, du fait même de l'originalité de chaque individu ; ceci rend complexe l'analyse entreprise et ne permet d'en déduire que des enseignements généraux en forme de tendances significatives. »

Cette opinion reflète parfois celle des autres experts au départ de leur lecture des documents fournis: un mélange de doute et d'intérêt. Chez lui le doute l'emporte devant ce qu'il pense être la quasi impossibilité de la tâche. En revanche les autres se sont investis dans la poursuite des examens, et y ont découvert une démarche logique et valable. L'objet limité de la thèse, en situation et en temps, permet de simplifier les analyses dans le champ d'hypothèses valables, ce que 7 experts sur 8 ont admis.

De plus, à l'usage, nous nous sommes aperçus que pour connaître quelle fonction cognitive et quels modèles mentaux élémentaires ont été utilisés par les pilotes dans une séquence donnée, il est inutile de faire a priori des hypothèses à ce sujet. Pour les découvrir peu importe de savoir quelles motivations affectives ou autres les ont initiés : les fonctions cognitives et les modèles mentaux étaient logiquement là.

B - Nous rapportons ici le commentaire de l'expert n°4 :

« L'analyse est bonne et en général exacte mais on se pose la question de savoir où l'on désire en venir au-delà des analyses de cas, considérées comme des préliminaires à autre chose. Quel est l'objectif exact de la thèse ? On est intéressé par cette suite. »

Ce commentaire montre l'intérêt des experts pour l'utilisation concrète des analyses, qui pour eux constituent un outil inédit pouvant être utilisé à d'autres fins à préciser, à trouver. Le Chapitre 9 en donne un exemple.

C- Un autre point important est la cause de la plupart des cotations « 2, Oui mais... ». Si les experts n'expriment pas aussi clairement que l'expert n°5 que dans les cas étudiés les pilotes « *n'ont pas été préparés ou ont été insuffisamment préparés* », ils sont en général étonnés des comportements observés, très éloignés de ceux qui à leurs yeux doivent être les comportements de professionnels responsables. D'où cette cotation « 2 » exprimant surtout cet étonnement.

Mais en général ils admettent n'avoir aucune réponse cohérente pour expliquer ces déviations en dehors de celles proposées dans la thèse qu'ils sont obligés d'admettre, sauf pour plusieurs séquences où ils ajoutent des hypothèses originales et crédibles, ajoutées dans les analyses de l'Annexe 2.

Il ne faut pas oublier cependant que 83% des analyses ont été acceptées sans réticence (cotation 1 « oui »), et que l'ensemble a été admis à 99% (cotations 1 « oui » + cotations 2 « oui mais... »).

D- Un avantage de la thèse exprimé par tous, a été explicité par l'expert n°4 :
« *En matière d'analyse des comportements, des facteurs humains, on a deux populations très spécialisées possédant chacune ses techniques et ses jargons le plus souvent imperméables à l'autre, les psychologues et les pilotes. La thèse est un moyen de permettre la liaison qui n'existe pas entre les deux spécialités. Il est donc indispensable de simplifier les exposés pour les rendre assimilables aux deux* ». Ce qui n'est pas aisé.

E- Les objections techniques de l'expert n°3, les remarques formulées par tous et les nouvelles hypothèses proposées renforcent la conviction qu'en dehors de faciles généralités toute analyse détaillée du comportement d'un pilote telle que présentée dans cette thèse doit s'appuyer sur l'exactitude technique et la bonne connaissance opérationnelle des situations dans lesquelles il se trouve.

6.4.2 – Autres avis

Deux personnalités ont exprimé une opinion uniquement par l'intérêt de la démarche de la thèse, reflétant une vue globale intéressante de l'analyse, sans intention précise de la juger.

A - Le premier expert, neurologue, a souligné l'originalité et les possibilités potentielles de la partition des analyses élémentaires en très courtes séquences, les rendant ainsi plus crédibles que si elles étaient conduites de façon moins détaillées.

Il considère que les facteurs psychologiques au moment de l'évènement soudain conditionnent aussi les réactions des acteurs, ce qui est vrai mais qui n'interfère pas avec l'analyse ainsi que précisé au Chapitre4.

Il pense que l'état actuel des connaissances neurologiques permettrait de déterminer des correspondances entre des comportements et les zones impliquées dans le cerveau. Ainsi par exemple le lobe frontal joue un rôle essentiel dans le choix des décisions. L'IRM fonctionnel devrait pouvoir être utilisé pour valider des hypothèses de la thèse.

B – Le deuxième expert, psychologue en contact direct avec des pilotes, a surtout insisté sur la difficulté dans les enquêtes d'accidents de déterminer les comportements cognitifs « internes » aux acteurs. Ce point est au cœur de la méthode proposée par la thèse.

Elle admet que la courte durée des séquences analysées facilite l'analyse du comportement cognitif.

7 – ANALYSE ET INTERPRETATIONS

RECOMMANDATIONS ASSOCIEES

7.1 – PRESENTATION

Ce Chapitre 7 rassemble les constats et hypothèses que, grâce à la méthode utilisée, nous pouvons tirer des analyses menées sur les 5 cas. La structure rationnelle de cette méthode autorise l'idée que les hypothèses formulées ici puissent aller, avec des aménagements probables, au-delà du cadre apparemment limité des 5 situations analysées.

Nous examinerons successivement :

- en **7.2** des caractéristiques importantes déduites des analyses du Chapitre 5 :
 - * absence d'influence de la connaissance a priori des paramètres affectifs sur les analyses cognitives élémentaires,
 - * et surtout la possibilité de trouver des points communs entre les comportements observés,
 - * enfin un constat sur la focalisation de l'attention ;
- en **7.3**, suite au Chapitre 7.2, des déductions sur le fonctionnement cognitif observé, avec des hypothèses sur le fonctionnement cognitif opérationnel sous stress ;
- en **7.4**, en déduction des chapitres précédents, des dénominateurs communs aux situations inattendues, soudaines et dangereuses, avec le rattachement des hypothèses mentionnées au comportement opérationnel des pilotes, et pour chaque dénominateur des recommandations en découlant.

7.2 – POINTS PARTICULIERS

7.2.1 – Influence de facteurs autres qu'opérationnels

La plupart des experts ont émis l'objection que le comportement des acteurs était forcément dépendant de conditions psychologiques, voire physiologiques, s'ajoutant aux paramètres professionnels et opérationnels lors de l'apparition de la situation perturbatrice. Cette objection est évidemment valable bien que par hypothèse on admette que ces conditions s'estompent devant le stress apporté par la situation.

Mais en revanche l'application de la méthode d'analyse a montré qu'elle était indépendante de l'état affectif des pilotes concernés. Ceci parce qu'elle considère de façon logique les comportements cognitifs élémentaires correspondant à la fois à des entrées objectives et à des sorties objectives, en incorporant entre les deux un comportement opérationnellement logique conforme à la paire entrée-sortie considérée. C'est l'examen de l'ensemble de ces comportements cognitifs élémentaires qui donne une idée sur les déficiences éventuelles ayant conduit à des comportements apparemment aberrants, qu'elles soient techniques, affectives, procédurales ou autres.

Ainsi l'on part, dans une brève séquence, d'éléments physiques objectifs (indications des instruments de pilotage, alarmes, position des leviers et commandes, mouvements avion) pouvant avoir été utilisés comme les « **entrées** » sensorielles (visuelles, auditives, tactiles, inertielles) des traitements cognitifs (perceptions, diagnostics, décisions, actions), cela en parallèle avec les résultats objectifs observés définissant les « **sorties** » de ces traitements pour la même séquence.

Ensuite on adapte ces entrées possibles aux sorties observées grâce à **des fonctions cognitives tirées de l'expertise opérationnelle** en utilisant une technique (ou un processus) bien connue des techniciens et fréquemment utilisée par eux appelée « reverse engineering ». La brièveté des séquences et les hypothèses définissant ces fonctions cognitives décrivent alors le comportement cognitif élémentaire immédiat sans qu'on ait eu besoin de le définir à l'avance. L'analyse ainsi effectuée tient automatiquement compte des processus internes individuels des acteurs, opérationnels et affectifs, sans qu'il y ait nécessité d'en tenir compte à l'avance.

En général cette confrontation « **entrées <=> sorties** » aboutit le plus souvent à une seule hypothèse possible sur la nature de la fonction cognitive en jeu. Parfois plusieurs hypothèses paraissent plausibles (deux au maximum dans les cas analysés). Elles sont alors traitées séparément.

L'addition chronologique de ces comportements élémentaires donne alors une idée rationnelle de la « situation cognitive » de l'acteur au cours du déroulement de ses actions, sans hypothèse supplémentaire a priori concernant les paramètres, affectifs ou autres, qui y sont automatiquement inclus. L'observation de cet ensemble permet ensuite de définir s'il s'agit in fine d'erreurs, de fatigue ou de tout autre problème.

Ainsi la méthode peut être utilisée dans n'importe cas opérationnel de faible durée, inférieure à la minute, pendant laquelle l'acteur cherche et utilise la solution estimée à son problème.

7.2.2 – Déductions principales des analyses

- L'évènement perturbateur est perçu rapidement, sans être forcément analysé.
- L'état de stress est immédiat.
- Le phénomène immédiat semble être une désorganisation mentale dans la possibilité d'effectuer des raisonnements logiques rapides.
- Cependant (est-ce une conséquence de cette désorganisation ou une réaction parallèle ?) les capacités cognitives conscientes sont instantanément mobilisées à leur maximum de possibilité.
- Un diagnostic immédiat est initié. Mais sans accès à la situation réelle, sans une vue globale de cette dernière, il mène à des focalisations néfastes ou à des erreurs d'interprétation. L'intuition ne marche pas à tous les coups, même pour des experts que sont les pilotes.
- L'importance du diagnostic ne réside pas en la connaissance de la cause mais en celle de la situation exacte réelle.
- Les réactions doivent être rapides, et correctes pour éviter l'amplification des dérives.

- La focalisation retarde et même inhibe la possibilité d'une prise de conscience de situation réelle lorsqu'elle utilise la totalité de la capacité consciente sur la mémoire court terme Mct.
- Elle génère des erreurs, un effet tunnel, des effacements sur la mémoire court terme Mct avec des oublis.
- Elle semble s'auto-entretenir.
- La focalisation visuelle entraînée par la focalisation de l'attention semble être la plus dangereuse.
- La sortie de focalisation nécessite un « choc mental » ; une alarme n'est pas forcément suffisante.
- Une alarme hors contexte est inopérante, voire néfaste.
- La récupération nécessite non la connaissance de la cause de l'évènement mais celle de la situation réelle. Mais cette dernière passe obligatoirement par l'abandon de la focalisation et son remplacement par une vision nette et immédiatement exploitable des éléments pertinents, ici de la position (espace et vitesse) par rapport au sol, et de l'état de la poussée.
- Cette récupération nécessite des actions simples pour être compatibles avec l'association temporelle *temps disponible* \Leftrightarrow *durée de la mémoire court terme*.
- La capacité de résolution par l'Homme des situations rapides, dynamiques et dangereuses issues de la mécanique du vol n'est pas adaptable à toutes les situations lorsqu'on lui demande, par l'exploitation complexe simultanée de plusieurs paramètres, de résoudre les problèmes immédiats inhérents à la situation présente.
- Il y a coexistence de deux phénomènes cognitifs : une rupture du fonctionnement cognitif antérieur par l'évènement déclencheur et une focalisation de l'attention.
- Cette dernière peut précéder le déclencheur et elle peut oblitérer ensuite le problème de gestion de situation,
- ou elle est causée par le déclencheur et elle peut alors oblitérer une gestion correcte de la situation.

7.2.3 – Analyse de la focalisation et de l'effet tunnel

Caractéristiques observées

- La focalisation de l'attention, phénomène classique et courant, mérite un regard plus précis sur ses déviations dangereuses observées.
Ses caractéristiques apparentes relevées sont assez diverses (voir 5.4).
Elle s'apparente à la concentration mentale sur une situation, mais en s'intéressant à un point particulier de cette situation.
Le phénomène de focalisation de l'attention est très variable. Dans les cas étudiés ici il intervient soit avant l'élément déclencheur des réactions consécutives à ce même élément, soit il est provoqué par l'évènement déclencheur lui-même. Dans tous les cas la situation de stress l'a transformé en effet tunnel et a provoqué des réactions inadaptées aux situations rencontrées qui nécessiteraient une correcte conscience de situation réelle. Il masque cette indispensable connaissance exacte de la situation

présente, et l'évaluation de son devenir. Il est donc dangereux, mais il est aussi prouvé qu'il peut survenir n'importe comment et n'importe quand.

- Ce qui suit confirme de façon concrète les caractéristiques mentionnées par *Wickens et al* (Wickens, Gordon, & Liu, 1998).

Dans les cas étudiés il y avait une concentration de l'attention causée par la conscience d'une phase de vol à risque, que nous pouvons assimiler à un bas niveau normal de stress opérationnel classique :

cas n°1 – obligation d'une remise de gaz non prévue,

cas n°2 – présence d'oiseaux sur la piste,

cas n°3 - mission délicate et conditions météorologiques marginales,

cas n°4 – figure de voltige près du sol,

cas n°5 – atterrissage avec une reverse inopérative.

Si l'on veut parler ici de stress bien que nous pensons qu'il s'agit là d'attention soutenue, on peut dire que l'intensité du stress était donc normale, faible.

Puis, important, survenait un élément déclencheur obligeant à modifier sous pression du temps le processus normal. Le stress augmentait alors notablement en intensité.

Mais dans cette obligation de changement tactique il y avait « accrochage » de l'attention, analogue à un accrochage radar pour un système matériel, sur un paramètre apparaissant ou perçu comme l'élément le plus important dans l'immédiat :

cas n°1 – l'évolution rapide de la vitesse avec ses limitations,

cas n°2 – la surveillance des impacts possibles avec les oiseaux,

cas n°3 – la stabilité des paramètres de descente,

cas n°4 – l'évolution de la vitesse,

cas n°5 – le maintien de l'axe de la piste.

Et cet accrochage sur un seul paramètre avec l'impossibilité de le maîtriser (et pour cause) assurait la pérennité de l'effet tunnel consécutif à la focalisation persistante.

Là nous devons nous poser la question du choix du paramètre ainsi « accroché ».

Dans les cas analysés il semble découler de l'importance que lui attribue le pilote dans l'exécution du vol avant la survenance de l'élément déclencheur, ce qui initierait son intuition. Ce serait alors une soudaine amplification de l'importance déjà accordée à un élément antécédent.

- L'intervalle de temps entre l'évènement déclencheur et la réaction consciente est un élément pouvant être positif si on l'utilise à l'analyse de la situation. Il a manqué dans les cas 2 et 4, mais bien que présent il a été utilisé tardivement mais utilement dans les cas 1 et 3, et n'a pas été utilisé dans le cas 5. Il est nécessaire mais pas suffisant.
- Cette focalisation de l'attention se traduit par l'occupation quasi-totale de l'attention sur une action voulue ou intuitive. Par cela elle utilise totalement ou presque la mémoire court terme Mct qui est le support temporel des actions en cours. Elle accapare ainsi la totalité des capacités du « niveau basique inférieur conscient » (voir 5.3.2). Elle peut s'accompagner d'une focalisation visuelle (cas 1, 3, 4), mais pas toujours.

Basée sur l'intuition elle peut se concentrer sur le diagnostic adopté d'emblée et ignorer toute autre perception en contradiction avec le diagnostic (cas n°1, 2, 3, 5).

Ou bien la capacité mentale maximale étant mobilisée pour atteindre la solution préconisée, il n'y a plus place pour les perceptions autres que celles utilisées dans la mise en œuvre de cette solution (cas n°1, 5). Ou bien, dans le cas d'actions lancées en séquences rapides, il y a ratage d'une séquence (cas n°4).

- La focalisation permanente (l'effet tunnel) est détruite par des interventions extérieures fortes, alarmes dans le contexte présent perçu, intervention humaine forte, perception visuelle périphérique anormale, mais les alarmes hors contexte sont rejetées. De plus si le 2^{ème} pilote, le PNF qui est un agent AGx dans l'organisation cognitive du cockpit et dont les tâches prévues sont censées prévenir les erreurs, ne remplit pas ces tâches la focalisation ne peut que persister. En fait cet agent humain AGx/PNF est alors le complément de l'agent AP2 (détecteur d'anomalie et d'ambiguïté) du pilote en fonction PF.

On voit poindre ici une notion nouvelle, celle d'un seuil de résistance à la perception de stimuli autres que ceux alimentant la focalisation. Cette notion a été définie en psychophysique pour des sensations physiologiques, par le rapport de seuil différentiel de Bouguer-Weber, $\Delta I/I = k$ pour une valeur de seuil ΔI rapportée au stimulus de base I à partir de la fonction de Weber-Fechner

$S = k \cdot \log I$ où S est la sensation et I est le stimulus. Une variation n'est perçue qu'au-delà de ce seuil proportionnel à l'intensité présente du stimulus en action. Pour l'abandon de la focalisation ce seuil mental serait une extrapolation de cette notion de seuil physiologique. Il serait d'autant plus élevé que l'intensité de la focalisation est forte.

- L'action correctrice suivant le « réveil » d'une focalisation doit être immédiate et sans ambiguïté : elle doit être simple sinon intuitive. D'abord l'acquisition de la situation réelle doit être immédiate (« réveil » de la prise de conscience de situation). Ensuite et immédiatement l'action correctrice doit surgir. Cependant elle provient de modèles mentaux « saillants » mémorisés, pas forcément ceux que nécessiterait la situation présente.

7.3 – DEDUCTIONS ET REMARQUES SUR LE FONCTIONNEMENT COGNITIF

7.3.1 – Hypothèse 1 : Fonction cognitive type de base (FCTB)

- Par analogie avec des systèmes physiques dynamiques nous soupçonnons des résonances internes au cerveau. Un stimulus du genre « surprise, ambiguïté sévère, alarme » exciterait un ensemble cohérent neuronique qui « rechercherait » une solution avec une procédure neuronique préétablie. L'agent AP2 serait alors l'élément essentiel déclencheur. La résonance permettrait au processeur opérationnel PO l'accès immédiat aux choix intuitifs d'actions d'après le schéma neuronique préétabli.

Une hypothèse envisageable serait donc qu'un évènement inattendu, soudain et présentant un danger provoque le recours spontané à une fonction cognitive FC type de base (FCTB) ayant des caractéristiques particulières constantes. Cette hypothèse, déduite uniquement des constatations faites dans la synthèse des 5 cas de l'Annexe 2, est à rapprocher d'un constat analogue au plan physiologique effectué par *H Selye* au sujet du stress (Selye, 1956) : l'organisme réagit toujours par une double réponse adaptative, l'une adaptée aux demandes environnementales, et l'autre non spécifique et identique en toutes situations.

En complément des phénomènes physiologiques il apparaît aussi des phénomènes psychologiques. Une autre étude précise la corrélation entre la variation de pression sanguine et l'activation de fonctions cognitives (Waldstein & Katzel, 2005) dans le cas d'évènements soudains.

Il y a donc une connexion neuro-psycho-physiologique dans le cas de stress.

A titre anecdotique on peut rappeler qu'objectivement dans la vie courante une situation inattendue et soudaine déclenche de façon quasi générale une exclamation, extériorisée ou non, du type « Oh ! », ou « Non ! », ou « M... ! », ou toute autre expression exprimant l'étonnement contraint. N'est-ce pas une réaction type générale ?

Cette fonction cognitive type de base aurait les caractéristiques suivantes :

a – Ouverture instantanée dès détection d'anomalie et mobilisation immédiate des capacités conscientes (niveau de détection d'anomalies NDA, suivi du niveau de gestion opérationnelle NGO, Chapitre 4). Cette ouverture serait soit consécutive à une désorientation mentale momentanée due à la soudaineté de l'évènement déclencheur, pour compenser cette désorientation, soit directement causée par l'évènement.

b – Analyse rapide de la situation à l'aide d'une combinaison de *perceptions immédiates dans le contexte présent* et de *prise instantanée de modèles* directement disponibles dans la mémoire de travail MT, ou à défaut dans les mémoires long terme Mlt, *s'appliquant à la fois aux perceptions et au contexte*.

Le modèle considéré comme adapté (habileté, procédure) est *le premier extrait*, suffisamment « contrasté » pour sortir le premier de la mémoire. Il correspondrait

(1) soit à la capture d'un évènement ou à une situation indélébile (par exemple incident ou accident vécu ou directement observé, soit en vol réel soit en simulation), parfois à une connaissance particulière bien assimilée et attachée au contexte perçu (technique ou scientifique, procédure, autre),

(2) soit à l'amplification d'une préoccupation antérieure au déclencheur.

Cette analyse ultra rapide peut être assimilée à une intuition, mais elle se base sur *l'immédiatement perçu*, donc sur *la conscience de la situation présente perçue* et pas forcément sur la situation réelle, donc elle peut être fausse.

c – Application immédiate du modèle prélevé avec l'objectif de corriger le problème initial perçu.

d – Cependant en l'absence d'un modèle disponible ou en extrême urgence l'objectif est la correction immédiate du problème perçu.

e – D'où dans tous les cas, focalisation de l'attention consciente sur la solution choisie et utilisation complète de la mémoire court terme Mct dans l'exécution de l'action ainsi lancée.

Remarque : notez que tout se rapporte à la perception immédiate.

- A ce stade trois possibilités de fonctionnement sont offertes à la fonction cognitive FCTB, dépendant principalement de façon positive de la formation, de l'éducation et de l'expérience, mais aussi de façon négative de la fatigue et de l'intensité du stress (*ici le stress provient de l'obligation vitale de sortir d'une situation inattendue et dangereuse ; on ne peut pas fuir et on cherche à tout prix comment « attaquer » la situation pour en sortir*) :

1 – **Fonction cognitive FC adaptative** : généralement utilisation d'une fonction de contrôle conscient de l'amélioration de la situation, de l'obtention de l'objectif dicté par la situation perçue, *laissant utilisable une part de la mémoire court terme Mct* devenant ainsi disponible pour autre chose que la réaction consciente immédiate. Cette fonction s'exerce en ouvrant le champ des perceptions au-delà de celles initiales. Elle permet de confirmer ou de réorienter le diagnostic, les objectifs, et les actions en complétant ou en corrigeant les perceptions initiales. La notion de résilience pourrait s'appliquer ici. Notez que *le temps disponible (au minimum plusieurs secondes seraient nécessaires) est un élément essentiel pour son établissement*.

2 – **Fonction cognitive FC focalisée** : *utilisation totale de la capacité consciente* pour résoudre le problème immédiat, ce qui efface rapidement toute mémorisation sur la mémoire court terme Mct autre que l'action immédiate, et qui empêche de sortir de façon consciente d'une situation persistant dans la dangerosité en dépit de tous les efforts. *Seul un « choc mental » peut arrêter cette focalisation lorsqu'elle est doublée d'un effet tunnel. Dans les cas analysés ce choc était produit par une alarme très contrastée et adaptée au contexte, ou par l'intervention énergique du deuxième pilote appliquant activement et avec vigilance la répartition des tâches dans le cockpit y compris et surtout celle de contrôler les actions de l'autre pilote.*

3 – **Fonction cognitive réflexe** : la situation est quasi-immédiatement perçue et assimilée à un cas stocké en mémoire dans un répertoire « d'actions en urgence », en général imprimées par la pratique, l'expérience. La réaction est initiée immédiatement (quelques dixièmes de seconde à quelques secondes). Mais ensuite elle laisse rapidement la place à l'évolution en fonction cognitive de type 1 adaptative, ou parfois 2 focalisée.

- Le problème d'action de la fonction cognitive de base FCTB est multiple :
 - Possibilité de rechercher la cause d'une fausse perception, problème initial de conscience de situation.
 - Possibilité de garder une part de capacité consciente à utiliser sur la mémoire court terme Mct, problème essentiel de l'éducation du comportement.
 - Problème d'extraction mnémonique d'une fonction cognitive FC correcte (associée aux modèles mentaux corrects), soit en perception immédiate soit en stand-by permanent, problème d'éducation opérationnelle.

- Possibilité d'un temps d'analyse disponible en partage de temps entre action consciente et réflexion, souvent une question de chance autant que d'éducation opérationnelle.
- Disponibilité psycho-physiologique suffisante.

7.3.2 – Hypothèse 2 : Influence du contraste entre situation présente et évènement

Elle vient en complément de la précédente. Lorsque survient l'évènement l'agent AP2 (vigilance, détection d'ambiguïté) est le premier concerné et il passe le contrôle conscient au processeur PO pour un diagnostic. Si le contraste de l'évènement sur la tâche en cours d'exécution est grand par son effet de surprise et d'inhabituel, il peut y avoir l'utilisation complète immédiate de la capacité mentale. Si celle-ci est mobilisée pendant une période dépassant la capacité temporelle de la mémoire court terme Mct le phénomène de focalisation avec effet tunnel survient.

En revanche si le contraste est faible, comme une faible perception de l'évènement associée à l'exécution d'une tâche difficile, par exemple une déviation lente de trajectoire intervenant pendant la gestion difficile d'un cas de vol avec phénomène météo préoccupant, cet évènement risque de ne pas être pris en compte par le processeur PO qui conserve la tâche en cours comme objectif et se focalise sur elle. Ce type de cas est fréquemment observé en vol. C'est l'analogie avec le seuil différentiel psychophysique de *Bouguer-Weber*, mais ici dans le sens d'activation et non de correction.

Dans le phénomène de focalisation on voit ici deux causes opposées, l'une venant de la prise en compte immédiate de la situation soudaine et amenant à oublier la gestion du vol en cours, l'autre au contraire provenant de la gestion délicate d'un cas de vol actuel et laissant passer la perception d'une situation soudaine imprévue. Mais dans les deux cas le phénomène dangereux de blocage est la très forte mobilisation de la capacité mentale pendant un trop long délai.

7.3.3 – Hypothèse 3 : Obligation de réactions simples

Elle est la conséquence obligée des observations et des hypothèses précédentes. Les situations sont rapidement divergentes sans correction adaptée alors que le temps disponible pour réagir est compté. Le modèle d'action extrait des mémoires long terme Mlt ou de travail MT doit être appliqué rapidement. Son application ne doit pas saturer la mémoire court terme Mct. L'ensemble de ces paramètres impose que le choix du modèle mental et de celui du modèle d'action lui-même soient simples, c'est-à-dire que les actions correctrices doivent être simples sinon intuitives vis-à-vis de la situation perçue. Cette obligation vient aussi de l'état de stress dans lequel se trouvent les acteurs.

7.3.4 – Hypothèse 4 : Constance de la limitation de la Capacité cognitive consciente

Concept de Capacité cognitive consciente

Cette hypothèse se rapporte à la limitation des capacités des traitements conscients simultanément dans deux dimensions :

- capacité de traitement cognitif conscient instantané (charge de travail mentale),
- capacité de garder ce traitement instantané en fonctionnement en utilisant ses traces mnésiques pendant le temps suffisant pour assurer la continuité des actions lancées (mémoire court terme).

L'utilisation efficace des fonctions cognitives amène à admettre que ces deux limitations concernent le même phénomène neuro-psychologique qu'on appellera « Capacité cognitive consciente » ou « CCC ». Cette capacité accueille l'action de toutes les fonctions cognitives conscientes agissant pendant la rémanence de la mémoire Mct. Notez que cette hypothèse de CCC rejoint celle du processeur opérationnel PO qui inclut la mémoire court terme pour fonctionner (Chapitre 3).

Cela peut se traduire par deux concepts liés.

- Une notion de « puissance cognitive » maximale pour prendre de façon libre une analogie mécanique. La capacité cognitive consciente (CCC) est une notion aisée à deviner mais difficile à définir, dérivée de la charge de travail mentale et pouvant représenter cette dernière. Pour cette thèse, utilisant les résultats des analyses du Chapitre 5 et de l'Annexe 2, on peut formuler une définition qualitative à défaut de caractéristiques quantitatives exactes : c'est le nombre maximum de traitements de tâches cognitives élémentaires conscientes par unité de temps. Cela se rapproche de la loi de Miller avec ses 7 « chunks ». Si l'on peut admettre pour unité de temps la seconde il faudrait définir une tâche cognitive unitaire élémentaire moyenne et mesurer sa durée. Nous y reviendrons plus loin.
- Une notion « d'énergie cognitive » maximale. C'est celle que le cerveau peut fournir pendant la durée de la mémoire court terme Mct en conservant sa charge de travail maximale, sa puissance cognitive maximale. C'est le produit de cette dernière par la durée de la Mct (10 à 20 secondes).

Pour compliquer le tout, le fait que la mémoire Mct agit en permanence tendrait à admettre que cette « énergie » serait plutôt une puissance en termes de mécanique si l'on prend la durée de la mémoire court terme comme unité temporelle au lieu de la seconde...

Dimension « puissance cognitive »

Au sujet de la dimension « puissance cognitive », à l'observation des cas traités nous pouvons déduire qu'elle semble être constante pendant la brève durée de l'évolution des situations. Elle est forcément individuelle et dépend de la situation momentanée. Elle inclut les tâches cognitives élémentaires.

Apparemment il y a correspondance directe entre une sorte d'intensité d'action de la fonction cognitive consciente agissant à un instant donné et la capacité cognitive consciente du pilote à cet instant.

Dans les cas étudiés le phénomène de focalisation de l'attention nous donne une indication sur la variabilité de cette dimension de la capacité cognitive consciente : par la saturation

des possibilités conscientes il semble indiquer qu'elle reste constante et égale à sa valeur maximum pendant la durée de rémanence sur la mémoire court terme Mct. Nous pouvons donc aussi penser que cette valeur maximum de saturation est celle dont est capable le pilote, avec ou non une focalisation, pendant le temps assez bref des événements (< 1 minute). Ce serait en quelque sorte la puissance maximum de l'activité cognitive consciente, une sorte de limiteur instantané des possibilités cognitives de l'individu.

Dans la thèse les actions cognitives élémentaires sont multiples, par exemple :

1. la perception, perçue directement ou recherchée ce qui inclut une action volontaire consciente ;
2. le traitement de la perception pour elle-même, avec son extraction d'un contexte, sa reconnaissance, son assimilation, au moyen de modèles mentaux MM ;
3. le traitement de la perception intégrée dans le contexte actuel perçu, avec une fonction cognitive FC, ayant accès aux mémoires long terme Mlt ou de travail MT pour en retirer les modèles mentaux MM ad hoc ;
4. ce traitement donne comme résultat une reconnaissance de situation, vraie ou fausse ;
5. toujours en relation avec le contexte cette conscience de situation amène à un diagnostic grâce à la même fonction cognitive FC ;
6. le diagnostic génère une décision, en général une action au travers d'une fonction cognitive FC, sauf si la décision est de ne rien faire ou d'attendre ;
7. l'action peut être simple et donc rapide ; ou bien elle est compliquée et elle prendra du temps pour se réaliser ;
8. le contrôle de cette action est recherché au travers de perceptions recherchées ;
9. d'où un bouclage fermé, asservi, et retour vers le traitement des perceptions.

Nous remarquons que toutes les actions conscientes sont conduites par des fonctions cognitives FC, parfois la même tout au long d'un processus donné, limité et chronologique. Une fonction cognitive donnée FCx exécute une tâche cognitive globale donnée « macroscopique » assignée par un agent AGn, et pour cela elle met en œuvre une succession de tâches cognitives élémentaires « microscopiques », des sous-tâches, que lui dicte le modèle mental MM (ou le réseau de modèles mentaux MMP) approprié. Il serait probablement possible de refaire les analyses des 5 cas de l'Annexe 2 en pointant et en estimant quantitativement (en nombre) les tâches élémentaires exécutées par les pilotes. On aurait ainsi un nombre Nt qui, comparé aux durées, donnerait un repère quantitatif estimatif de la capacité cognitive consciente moyenne des actions, donc des tâches, élémentaires des pilotes.

Ainsi la puissance cognitive maximale Pc serait exprimée par le nombre de tâches élémentaires effectuées dans l'unité de temps :

$$Pc = Nt / \text{durée}$$

A titre indicatif on a par exemple mesuré la durée de lecture d'une valeur sur une échelle de vitesse ou d'altitude, environ 0,7 sec, donc il n'est pas impensable qu'on puisse conduire de telles analyses. Mais il faudrait aussi tenir compte des « seuils » entre les fonctions élémentaires, par exemple pour les perceptions :

- seuil de perception audio : 0,5 ms ; discrimination possible entre 2 stimuli : entre 3 et 20 ms.

- vision : discrimination de mouvements au-delà de 20 ms ; mémorisation sensorielle 100 à 150 ms.
- discrimination temporelle audio 18 +/- 7 ms, visuelle 69 +/- 5 ms.

Dimension « énergie cognitive »

Ainsi la valeur quantifiée d'une tâche cognitive donnée T_c , globale ou élémentaire, le travail cognitif correspondant ou l'énergie cognitive dépensée, serait le produit de la puissance cognitive consciente P_c par la durée de cette tâche Δt :

$$T_c = P_c \times \Delta t$$

Mais il y a aussi une limitation temporelle, celle de la durée de rémanence sur la mémoire court terme M_{ct} . Et comme déjà vu si la durée Δt de la tâche T_c venait à excéder celle de la rémanence de la mémoire court terme M_{ct} (10 à 20 sec), il y aurait une importante probabilité d'effet tunnel par effacement des séquences déjà planifiées sur cette mémoire et qui auraient pu orienter différemment l'attention.

Ainsi une autre formulation de cette limitation est possible. Le produit de la puissance cognitive consciente P_c par la durée de rétention Δt_m sur la mémoire court terme M_{ct} , représente une sorte « d'énergie cognitive consciente » maximale possible, $E_{cc} = P_c \times \Delta t_m$, que le cerveau serait capable de maintenir de façon indépendante de l'instant présent pendant la durée totale de la situation à problème.

En cas de focalisation de l'attention la capacité immédiate utilisée par ce phénomène arrive par effet tunnel à saturer la mémoire court terme.

Comme dit dans l'hypothèse 2 (voir 7.3.2) il faut alors une coupure brutale dans cette continuité pour que la capacité immédiate passe à une autre utilisation, mais avec apparemment la même intensité ou puissance.

Remarques

A ce stade il serait vain de rattacher ces appellations « libres » appliquées à des notions cognitives aux définitions rigoureuses d'intensité, de puissance, de travail de la mécanique rationnelle sans en connaître la nature physico-physiologique.

Reliée à l'observation des zones neuronales impliquées dans les activités conscientes, cette façon de regarder les phénomènes cognitifs offre probablement de nouvelles perspectives pour les étudier, de façon neuropsychologique quantitative et pas seulement qualitative.

7.3.5 – Probabilités ou certitudes

Une remarque qu'on peut faire sur la méthode utilisée est que le recours à la « super-expertise » amène automatiquement à définir des comportements « quasi-certains », c'est-à-dire où la probabilité d'avoir d'autres explications est très réduite, sinon nulle. Evidemment on peut toujours oublier l'importance d'un facteur secondaire ignoré ou négligé, mais cette méthode basée sur la découverte des comportements élémentaires, le plus souvent oubliés

des acteurs dès que passés, est très précise et « *même inquiétante* » ainsi que qualifiée par un expert. Elle ne laisse pas beaucoup de place à l'incertitude.

Cependant son extension à l'étude de situations engendrées par de nouveaux systèmes, et non plus à l'étude de cas connus et mesurables comme les accidents, oblige à faire des hypothèses sur les comportements non plus d'un individu donné mais de l'ensemble d'une population. Et là il est nécessaire de faire intervenir une dose de probabilité dans chaque hypothèse de comportement.

Nous avons regardé comment la notion d'entropie, ou plutôt de néguentropie utilisée en psychologie, dans la théorie de l'information ou de la communication et en particulier la théorie de Shannon, pouvait convenir à la poursuite de la recherche. L'application de ces théories ne nous paraît pas être aujourd'hui d'un grand secours dans leur état actuel car trop floues et compliquées à manier ici malgré un certain succès en linguistique. Les mathématiques rigoureuses ne s'appliquent qu'à des cas mesurables et le chapitre précédent montre combien il reste à faire pour définir de façon précise des tâches cognitives élémentaires, microscopiques.

7.4 – RESULTATS ET COMMUNS DENOMINATEURS ; RECOMMANDATIONS

7.4.1 - Résumé

Les hypothèses des Chapitres 7.2 et 7.3 ci-dessus mériteraient évidemment d'être confirmées par une expérimentation, ce qui est impossible dans le cas de cette thèse, n'ayant ni laboratoire ni simulateur opérationnel à notre disposition. Cependant les « dénominateurs communs » qui en découlent ne font qu'étayer les nombreuses observations de cas réels rencontrés dans l'exercice de la profession.

Les résultats, les dénominateurs communs des comportements, sont exprimés dans les 4 hypothèses du Chapitre 7.3, qu'on explicite de façon opérationnelle en 4 points en y associant nos recommandations découlant des conséquences opérationnelles..

Ces recommandations concernent plusieurs domaines :

- la SELECTION des pilotes, leur EDUCATION de base et leur FORMATION sur des avions de type donné,
- l'amélioration des interfaces avec l'avion pour de meilleures et rapides prises de conscience et de perception de situations, par des PRESENTATIONS SYNTHETIQUES et des PROCEDURES adaptées.

7.4.2 – Premier point : Evènement déclencheur

Dès l'apparition d'un évènement déclencheur, de contraste important, il y a mobilisation totale avec stress de la capacité mentale maximum par une fonction cognitive de haut niveau

pour les tâches de diagnostic et de décision, avec interruption des tâches conscientes en cours.

Conséquences :

Peu de chose à dire sur ce point. La prise en compte de la situation nouvelle est très rapide et une tactique de correction se met en place de façon tout aussi rapide. Cependant cela se passe avec montée immédiate de stress. Les actions conscientes en cours sont abandonnées, mais les capacités cognitives sont mobilisées à leur maximum.

La soudaineté de l'évènement peut provoquer une désorganisation mentale limitant les possibilités de raisonnement logique.

Recommandations :

Le niveau de stress est fonction du niveau de surprise. Dans les avions modernes, confortables et fiables, la surprise est d'autant plus forte et inattendue que les situations difficiles se font rares. Il est donc nécessaire d'avoir recours à une **EDUCATION** de la vigilance permanente, le simulateur de vol semblant être le meilleur outil.

De nombreux systèmes et méthodes sont élaborés pour garder « l'éveil » pendant les vols de longue durée, mais ils ne remplacent pas la mise en mémoire long terme Mlt de cette fonction de vigilance permanente de base.

D'autre part une résistance à la désorganisation mentale provoquée par le stress est aussi à établir par l'**EDUCATION** de la maîtrise de soi.

7.4.3 – Deuxième point : Diagnostic

Focalisation de l'attention pour un diagnostic, basé sur la perception immédiate de la situation, vraie ou fausse, et sur l'intuition qui peut polluer le diagnostic.

Pour qu'un diagnostic soit le meilleur possible trois conditions simultanées sont nécessaires :

- (1) une aptitude immédiatement disponible aux analyses rapides,
- (2) une perception rapide correcte de la situation,
- (3) un minimum de temps disponible pour établir une conscience de situation correcte.

Or les disponibilités cognitives correspondant aux trois conditions sont fonctions du temps disponible, donc très contraintes par l'urgence.

Conséquences :

La perception est celle d'une situation nouvelle et imprévue dont on cherche immédiatement des informations la décrivant, avec l'objectif de la traiter. Les premiers éléments perçus décrivent cette situation et non ses causes. C'est donc a priori la situation qu'on s'efforce d'évaluer pour définir les actions appropriées à sa correction.

On a tendance à croire qu'il s'agit souvent « d'actes réflexes » dictés par un diagnostic instantané. En réalité rien n'est instantané et la moindre action cognitive nécessite du temps pour s'accomplir, dont le diagnostic lui-même.

Ce dernier peut être rapide ou lent (la durée peut s'étendre de quelques dixièmes de seconde à quelques dizaines de secondes), correct ou erroné. L'intérêt est d'obtenir un diagnostic correct le plus rapidement possible. Comment ?

A - Souvent il se base sur l'intuition : par exemple on a vu des oiseaux donc on aura très probablement une ingestion d'oiseaux dans les moteurs ; ou bien la conjonction des indications d'alerte d'altitude et d'interception d'altitude signifie probablement qu'on a dépassé cette altitude ; etc. Ainsi on a pré-orienté le diagnostic en désignant une cause qui passe de probable à « certaine ! » lorsque survient l'évènement. Lorsque les faits confirment l'intuition on obtient un diagnostic de situation rapide. En revanche dans le cas inverse et si les actions correctrices sont lancées d'après un mauvais diagnostic, il y a une énorme perte de temps pour récupérer la réalité, quand on le peut.

Nous avons vu que l'accrochage de l'attention sur les paramètres clés vient probablement de l'intuition que le pilote associe à l'importance de ces paramètres dans la période précédant l'évènement perturbateur (voir 7.2.3).

B - Autre base du diagnostic, la perception immédiate de la situation.

On parle ici de perception de situation plutôt que de conscience de situation, qui évoque la possibilité temporelle d'analyse, car le temps étant compté il est nécessaire de juger très rapidement la situation.

La conscience de situation est une notion connue. Elle a été souvent analysée et même a fait l'objet de certaines mesures (Endsley & Garland, 2000). C'est l'un des principaux axes d'action des organisations en charge de la sécurité des vols.

Cette perception peut se présenter de façon simple ou complexe. C'est l'élément essentiel, mais comment peut-elle être à la fois correcte et rapide ? La réponse porte sur trois conditions.

1 - D'abord le pilote doit être en possession de ses capacités cognitives correctes :

* Son **état psycho-physiologique** doit lui permettre de gérer normalement sous stress un cas de vol délicat, ce qui est normal et courant dans la profession. C'est-à-dire sa capacité cognitive doit autoriser le fonctionnement efficace de sa fonction cognitive type de base pour la recherche et la confrontation rapides :

(1) des éléments fournis par les diverses perceptions et

(2) des modèles mentaux stockés dans les mémoires long terme et/ou de travail. C'est ici qu'apparaissent les problèmes affectifs limitatifs éventuels tels que ceux dus à la fatigue ou à un problème de santé.

Recommandations :

Ces problèmes sont normalement traités dans la pratique et font l'objet pour les pilotes de règlements sérieux. Il s'agit aussi de **DEONTOLOGIE** personnelle vis-à-vis de sa condition physique et mentale.

* Sa **formation professionnelle et technique** doit lui permettre d'éventuellement comprendre la situation imprévue pour trouver et trier efficacement les modèles mentaux appropriés.

Recommandations :

Là aussi intervient l'**EDUCATION** déjà évoquée mais aussi la **FORMATION** technique. L'**EXPERIENCE** professionnelle joue un rôle important.

Cette éducation doit lui permettre, comme déjà dit, d'accepter les situations imprévues et soudaines sans que le stress n'apporte un quelconque comportement négatif entravant ses processus cognitifs. Il s'agit là de la maîtrise de soi. Il est certain qu'ici la **SELECTION** professionnelle et l'expérience confortent ce point, mais l'éducation peut accélérer considérablement son acquisition et conforter sa rétention.

2 - La perception de la situation passe par le traitement des informations sensorielles.

- Les Chapitres 3, 4 et 5 précisent quelles sont ces informations. Les visuelles sont de loin les plus importantes, les auditives sont d'exploitation plus difficile, les tactiles nécessitent souvent une confirmation visuelle, et les inertielles ne sont pas fiables.

Ainsi pour les informations visuelles le pilotage normal utilise de nombreux paramètres qu'il est nécessaire de combiner mentalement pour avoir une conscience correcte de la situation dynamique de l'avion, de sa position dans les trois dimensions, de sa position géographique par rapport aux repères de navigation, par rapport à la piste ou aux obstacles, de l'état des moteurs et des systèmes, des aides automatiques au pilotage, etc.

- Lorsque la situation nouvelle n'influence que peu de paramètres eux-mêmes très visibles, sa perception se présente de façon simple, donc avec très peu d'ambiguïté ce qui facilite le diagnostic. C'est le plus souvent le cas. En revanche, par exemple dans la combinaison de plusieurs causes de pannes ou dans la « cascade » rapide de leurs conséquences, le tri et la combinaison des paramètres pertinents n'ont rien d'évident (cas de l'explosion d'un moteur provoquant de multiples pannes de systèmes). C'est là qu'une présentation synthétique de ces paramètres permet à la fois la diminution des ambiguïtés et l'augmentation de la rapidité de leurs perceptions, par exemple avec une représentation 3D (en trois dimensions) d'une trajectoire parmi des obstacles, au lieu de l'exploitation cognitive de 2 ou 3 graphiques séparés (par exemple l'ensemble des PFD « Primary Flight Display », ND « Navigation Display » et VD « Vertical Display » des cockpits récents) comme c'est le cas actuel.

Cette exploitation mentale sous stress de plusieurs présentations est dévoreuse de temps et source d'erreurs d'interprétation. Or curieusement beaucoup de pilotes ayant été formés sur cette exploitation simultanée de plusieurs graphiques sont réfractaires au changement, peut-être par crainte de quitter des processus mentaux connus chèrement acquis pour aller vers d'autres incertains, ou parce que cela leur retirerait le privilège de leur habileté mentale « exceptionnelle »... réelle certes mais parfois occasionnellement limitée donc dangereuse ?

Recommandations :

C'est là qu'une **PRESENTATION SYNTHETIQUE** des paramètres pertinents, ou peut-être directement des **CONCEPTS** qu'ils représentent (voir 8.3), permettrait à la fois la diminution des ambiguïtés et l'augmentation de la rapidité de leurs perceptions, par exemple avec une

représentation 3D (en trois dimensions) d'une trajectoire parmi des obstacles, au lieu de l'exploitation cognitive de 2 ou 3 graphiques séparés (par exemple l'ensemble des PFD « Primary Flight Display », ND « Navigation Display » et VD « Vertical Display » des cockpits récents) comme c'est fréquemment le cas actuel.

3 - Il faut laisser au cerveau, à la fonction cognitive type de base, le temps d'effectuer l'ensemble des traitements cognitifs nécessaires.

- Suivant les conditions mentionnées ci-dessus ce temps peut varier de quelques dixièmes de seconde à plusieurs dizaines de secondes. Si le taux de détérioration de la situation le permet (c'est le facteur chance) le problème a une bonne probabilité d'être résolu. On a de toute façon intérêt à ce que ce temps de définition du diagnostic soit le plus réduit possible. Il ne faut pas oublier qu'en cas de durée dépassant celle de la capacité mémorielle de la mémoire court terme, le phénomène d'effet tunnel est hautement probable.
- Les capacités et les facilités de perception évoquées dans les deux paragraphes précédents diminuent les temps nécessaires, il faut donc essayer de les optimiser.

Recommandations :

En fait il faut laisser au cerveau, à la fonction cognitive type de base, le temps d'effectuer l'ensemble des traitements cognitifs nécessaires à un bon diagnostic.

Ceci est fonction de plusieurs paramètres dont le principal est l'**EDUCATION** de la maîtrise de soi.

Cette éducation peut être obtenue par des exercices au simulateur de vol, mais l'**EXPERIENCE** et la **SELECTION** de base sont aussi des éléments primaires.

7.4.4 – Troisième point : Décision-Action

Il y a focalisation de l'attention sur l'action correctrice définie pertinente d'après le diagnostic, beaucoup plus basée sur la recherche de sortie de la mauvaise situation que sur la recherche de ses causes, avec utilisation maximale de la capacité mentale instantanée. Cette action correctrice doit être simple et intuitive.

Ici nous admettons qu'il y a coïncidence entre la décision prise suivant le diagnostic et l'action qui est instantanément lancée.

La décision est le trait d'union logique entre diagnostic et action : ici elle n'est autre que l'introduction de l'objectif de se sortir de la situation dangereuse dès que le diagnostic est perçu « acceptable » pour pouvoir lancer une action quelconque.

En conséquence les conditions cognitives requises dans cette phase « action » remplacent celles du diagnostic en étant les mêmes, et on peut reprendre tout ce qui a été dit au Chapitre précédent. En revanche il y a des différences qui sont (1) que les processus ne sont plus uniquement mentaux, (2) surtout que les actions physiques demandent du temps pour être accomplies et (3) qu'elles requièrent des actions conscientes en boucles fermées.

Deux possibilités dans l'action:

(1) possibilité de contrôle du résultat, de correction ou de réflexion, donc de maîtrise de la situation si la durée de focalisation ne sature pas la mémoire court terme,

(2) impossibilité de maîtriser la situation en urgence, apparition du phénomène d'effet tunnel avec saturation de la mémoire court terme et divergence dangereuse de la situation.

Conséquences :

Suite au diagnostic la décision d'une action correctrice est prise. Son succès dépend de nombreuses conditions.

1. La décision d'appliquer l'action s'adaptant au mieux à la situation perçue peut s'apparenter à une intuition, avec tout ce qu'on a déjà vu dans les cas d'intuitions vraies ou fausses. L'intuition peut agir positivement ou non, et ce qui a été dit au Chapitre précédent s'applique aussi.

2. Cette décision peut être de ne rien faire, en attendant de mieux comprendre la situation alors qu'on ne sait pas quoi faire, ou parce qu'on pense qu'on n'a pas de prise sur son évolution, ou qu'elle va évoluer dans le bon sens. Dans ce cas « l'action » de ne rien faire consiste cependant à observer l'évolution de la situation jusqu'à l'instant où s'établit un diagnostic débouchant sur une solution acceptable. Le cas de « paralysie » devant la difficulté de la situation n'est pas traité car il est très exceptionnel, bien que l'auteur l'ait observé dans sa vie professionnelle sur des sujets ayant dépassé leurs propres compétences.

3. Si une action est lancée, l'attention se fixe normalement sur la recherche d'une solution de sortie de la situation délicate, qu'on connaisse ou non ses causes. En fait il s'agit de la même fonction cognitive que pour le diagnostic, qui passe de façon temporelle et continue du mode diagnostic au mode action. C'est elle qui déclenche une recherche ultra-rapide.

La capacité mentale est utilisée à son maximum d'intensité, mais sachant que le temps est compté et se trouvant de facto sous stress, on s'arrête sur la solution surgissant la première, à la fois paraissant convenir au contexte perçu et satisfaisant les possibilités immédiates.

Ce phénomène d'extraction ultra-rapide de modèles mentaux des mémoires, a peut-être recours à des résonances mentales, ce qui mériterait une expérimentation appropriée. Il s'agit d'une comparaison entre situation présente perçue et modèles mentaux ou images mentales analogues, ou rattachés à des événements voisins, stockés en mémoire long terme et/ou de travail.

Notez que la solution surgissant la première est celle ayant dans les mémoires le plus de contraste, le plus de saillance par rapport à celles comparables mais de moindre contraste. Ce qui signifie qu'elle n'est pas forcément l'optimale, comme par exemple le recours à une ancienne procédure très mémorisée remplacée par une nouvelle plus efficace, connue mais insuffisamment utilisée opérationnellement (freinage dans le cas n°2).

4. Il y a donc focalisation normale de l'attention sur l'action correctrice définie pertinente d'après le diagnostic. Cette action globale est rarement définie totalement d'emblée. Elle est lancée avec l'impérieux souci qu'elle aille dans le sens des améliorations et qu'elle s'adapte (en boucle fermée) aux résultats perçus des actions élémentaires lancées. La nécessité d'agir rapidement, alors qu'on est sous l'emprise de stress, oblige à opter pour des solutions simples.

5. Le recours à des procédures correctrices est une solution courante dans la profession, très orientée vers leur utilisation intensive. Les procédures opérationnelles ont des objectifs strictement définis, et elles sont nécessaires et d'utilisation correcte si elles sont concises et aisément compréhensibles. Mais elles sont de toute façon insuffisantes car ne pouvant pas traiter l'infinité de combinaisons possibles de situations et de pannes. Lorsqu'elles sont nombreuses leur chance de mémorisation est à l'inverse de leur nombre.

De plus, lorsqu'elles sont compliquées et/ou longues, leur utilisation est contre-indiquée et souvent impossible à conduire. Il en est de même pour des procédures paraissant se situer hors du contexte perçu.

6. A l'examen des nombreux cas d'incidents et d'accidents aériens un problème d'importance vitale mais non résolu est défini par *Claude Lelaie*⁵ : « *Les cas dangereux les plus fréquents et causant le plus de soucis pour leur potentialité accidentogène sont ceux de mauvais choix dans les manœuvres et procédures à adopter lorsque l'action requise dans une situation de stress ou de temps limité exige de sortir de la procédure apprise mais inapplicable dans la situation présente* ».

7. La vision est l'entrée privilégiée des sensations perçues et traitées par les pilotes. Ainsi que mentionné dans le Chapitre 3 ce canal est très performant mais sert simultanément à plusieurs fonctions séparées : prise en compte de paramètres en vue de leur traitement, prise en compte des mêmes paramètres pour leur contrôle en boucle fermée, obligation du balayage visuel pour rechercher les paramètres pertinents immédiats avec changement de boucle de traitement, vision focalisée et vision périphérique. Ces évolutions de fonctions, souvent rapides, ne sont pas instantanées et la durée totale de leur traitement conscient en boucles entremêlées est comptabilisée sur la mémoire court terme, qui est utilisée de façon d'autant plus longue que les actions élémentaires requièrent plus d'attention.

8. Il faut un minimum de temps disponible pour l'établissement des actions cognitives entre l'apparition du phénomène déclencheur, le diagnostic et le début d'une action correctrice. Une durée de 1 à 5 sec suivant l'urgence des cas paraîtrait nécessaire.

Pour certaines actions demandant une action immédiate et pour des phases de vol de durée inférieure à la minute, comme l'arrêt au décollage, les règlements acceptent la seconde, ce qui demande un entraînement spécifique particulier à cette phase de vol bien répertoriée, car une réaction consciente de 1 sec pour un événement soudain n'a rien d'évident. Mais dans ce cas précis d'arrêt au décollage il y a pré-orientation des modèles mentaux ad hoc car le briefing avant décollage traite son éventualité.

Cependant certaines situations telles que le débrayage soudain du pilote automatique PA dans des cas de « hors trim » important (d'évolution anormale de la situation de l'avion éloignée de l'équilibrage initial) amenant un mouvement brutal de l'avion (suppression brutale d'une action corrective du pilote automatique alors que l'avion est équilibré par son trim pour un cas de vol différent de l'actuel) exigent une réaction immédiate dans le bon sens pour éviter la perte irrémédiable de contrôle, ce qui donne une double exigence de brièveté de temps de réaction, et d'action de sens correct.

⁵ Claude Lelaie, Senior Vice-President, Product Safety, Airbus, entretien du 5 mars 2009

9. Le succès de l'action lancée dépend aussi de deux possibilités cognitives :

A - Si la durée de focalisation de l'attention, en général visuelle, ne sature pas la mémoire court terme, il y a possibilité d'introduire des corrections et/ou de réfléchir, donc de contrôler le résultat de l'action lancée et de l'infléchir éventuellement. C'est ce qui est souhaitable.

B - S'il y a impossibilité de maîtriser la situation, il y a saturation de la mémoire court terme avec une attention bloquée et apparition du phénomène d'effet tunnel. Et comme il n'y a alors pas de correction la situation diverge dangereusement et le plus souvent avec rapidité.

A ce sujet une remarque déjà formulée mais qui mériterait une confirmation. Apparemment et observé en formation des équipages : la durée de rétention sur la mémoire court terme diminue avec l'augmentation de la charge cognitive et l'apparition de la focalisation, et dans les cas concernés ici elle serait plus près de 10 sec que de 20 sec à l'approche de la saturation.

Recommandations :

Les conditions souhaitables sont les suivantes.

1 - Le phénomène d'extraction ultra-rapide de modèles mentaux des mémoires consiste en une comparaison entre situation présente perçue et modèles mentaux ou images mentales « analogues », ou rattachés à des événements voisins, stockés en mémoire long terme et/ou de travail.

Cet exercice mental devrait faire l'objet d'une **EDUCATION** pour que la fonction cognitive de base en tienne structurellement compte. Ce point rejoint les cas précédents d'éducation dans le diagnostic.

2 - La nécessité d'agir rapidement, alors qu'on est sous l'emprise de stress, oblige à opter pour des **SOLUTIONS SIMPLES**.

On a déjà vu que le recours à des procédures correctrices n'est pas suffisant car ne pouvant pas traiter l'infinité de combinaisons possibles de situations et de pannes. Donc l'enseignement de procédures spécifiques doit être limité et doit faire place à l'**EDUCATION DE PRINCIPES SIMPLES** de réactions à des situations imprévues. L'extension des méthodes LOFT au simulateur de vol semble être une bonne solution.

Lorsqu'elles sont compliquées et/ou longues, l'utilisation de **PROCEDURES** est contre-indiquée et souvent impossible à conduire. Il en est de même pour des procédures paraissant se situer hors du contexte perçu.

Un exemple de procédure à cauchemar était dans les années 1990 celle de recherche de la cause de fumée en cas de feu ou de départ de feu à bord. Il s'agissait de séquences de manipulations de commandes de systèmes, avec masque, faible visibilité dans la fumée, une grande partie des instruments de vol inopérants, sous stress et pouvant durer plusieurs minutes, tout cela en continuant de piloter l'avion en assurant la sécurité immédiate. L'entraînement à cette procédure faisait partie de la formation certifiée, mais le maintien de la compétence nécessaire n'avait rien d'évident car il s'agissait de cas d'occurrence de panne statistiquement peu probable.

3 - La vision est l'entrée privilégiée des sensations perçues et traitées par les pilotes. Elle sert simultanément à plusieurs fonctions séparées. Ces évolutions de fonctions, souvent rapides, ne sont pas instantanées et la durée totale de leur traitement conscient en boucles entremêlées est comptabilisée sur la mémoire court terme. Ce point renvoie à la **PRESENTATION SYNTHETIQUE** des informations.

4 - Il faut un minimum de temps pour l'établissement des actions cognitives entre l'apparition du phénomène déclencheur, le diagnostic et le début d'une action correctrice. Une durée de 1 à 5 sec suivant l'urgence des cas paraîtrait nécessaire.

Comme déjà vu pour certaines actions demandant une action immédiate et pour des phases de vol de durée inférieure à la minute, comme l'arrêt au décollage, les règlements acceptent la seconde, ce qui demande un **ENTRAINEMENT SPECIFIQUE** particulier à cette phase de vol bien répertoriée. Il y a pré-orientation des modèles mentaux ad hoc car le **BRIEFING** avant cette phase de vol traite son éventualité. Le Briefing préalable à toute phase délicate prévisible est une excellente pratique, repositionnant des procédures sur la mémoire de travail MT, ainsi immédiatement disponibles lorsque nécessaires. Cependant son efficacité diminue considérablement si les pilotes ne le pratiquent pas dans une situation où leur attention est disponible ou lorsque l'application du briefing devient machinale après plusieurs étapes dans la journée.

Certaines situations critiques telles que le débrayage soudain du pilote automatique PA exigent une réaction immédiate dans le bon sens pour éviter la perte irrémédiable de contrôle, ce qui donne une double exigence de brièveté de temps de réaction, et d'action de sens correct. Ces cas devraient faire l'objet d'une **FORMATION SPECIFIQUE** pour fixer durablement le diagnostic et la réaction appropriée dans la mémoire long terme Mlt.

7.4.5 – Quatrième point : Interruption de l'effet tunnel

S'il y a effet tunnel la focalisation ne peut être interrompue que par une intervention rapide de fort contraste.

La focalisation de l'attention est un phénomène cognitif normal qu'on observe en toute occasion. Mais lorsque cette focalisation persiste au point d'oublier ce qui est autour ainsi que les autres actions nécessaires à mener, le phénomène s'installant d'effet tunnel est dangereux.

Conséquences et recommandations:

1. La focalisation de l'attention semble s'auto-entretenir quand l'action menée ne paraît pas conduire aux résultats escomptés.

Pour l'éliminer il faut rompre la focalisation par une **INTERVENTION D'AUTANT PLUS FORTE ET CONTRASTEE** que le blocage de l'attention est verrouillé par le fonctionnement conscient autonome en boucle fermée et à pleine capacité mentale.

Cette intervention doit « réveiller » le pilote par son intensité et sa nature pertinente dans le contexte de la situation. Une alarme hors contexte ne sera probablement pas retenue.

2. Dans un équipage à deux pilotes, **le rôle du pilote non en fonction (PNF) est PRIMORDIAL** dans la mesure où il complète correctement les tâches du pilote en fonction (PF), et où il décèle les déviations de situations.

Le rôle du pilote non en fonction (PNF) est alors essentiel dans son rôle de surveillance des situations et de détection des anomalies. Cependant il faut noter que ce PNF a pour de nombreuses raisons des tâches spécifiques à mener et que son attention est loin d'être prise à 100% par cette fonction de contrôle. En pratique la formation du PNF est beaucoup plus axée sur l'enseignement de ses tâches spécifiques en équipage à deux que sur cette fonction de contrôle, malgré l'introduction de cours de CRM, « Crew Resources Management », où l'on essaie d'apprendre à s'entraider entre pilotes.

Un autre cas préjudiciable à cette fonction de contrôle est celui où le PNF est le commandant de bord, lorsque ses responsabilités de commandement prennent le pas sur ses fonctions de contrôle en tant que PNF, au détriment de la répartition des tâches en équipage alors que le pilote en fonction (PF), le copilote, doit exécuter seul l'ensemble des tâches prescrites aux deux.

8 - REFLEXIONS AMENEES PAR LA THESE **ET ACTIONS SOUHAITABLES**

8.1 – PRELIMINAIRES

Bien que ne concernant qu'un domaine limité du comportement humain, mais qui est important pour la sécurité opérationnelle des vols, les enseignements sont nombreux et variés. Ce Chapitre va essayer d'en résumer les principaux, en les classant en plusieurs catégories :

- En **8.2**, utilisation de la méthode d'analyse cognitive développée,
- En **8.3**, poursuite de la recherche et développement de la méthode,
- En **8.4**, conséquences de l'existence de la fonction cognitive de base, en particulier sur les interfaces pilote/avion, sur l'éducation/formation, et sur les critères de sélection.

Pour le dernier point nous reprenons en détail les dénominateurs communs du chapitre précédent en proposant les mesures appropriées pour corriger les conséquences négatives prévisibles. Il y aura donc forcément quelques redites dont nous prions le lecteur de nous excuser.

8.2 – UTILISATION DE LA METHODE

La spécificité du thème de la thèse nous a obligés de définir une méthode originale permettant à la fois de synchroniser le temps physique réel et le temps psychologique, d'analyser des comportements élémentaires pour des intervalles temporels très courts, de déceler des limitations dans les comportements cognitifs humains, de déceler des déficiences dans les interfaces pilote/avion.

Elle a permis d'analyser des cas d'incidents graves et d'accidents parfois difficilement explicables en mettant en lumière des hypothèses probables de comportement des pilotes dans leur environnement opérationnel et dans le contexte des situations particulières leur étant imposées. Mais elle a aussi permis de constater son adaptation à la recherche d'optimisation d'équipements opérationnels dans une phase de vol normale ainsi que le montre l'exemple porté dans le Chapitre 9 suivant.

Ainsi elle s'applique aussi bien à l'analyse prévisionnelle de cas qu'à celle de cas observés, donc elle est utilisable aussi bien par les bureaux d'études que par les services d'analyse d'incidents et d'accidents. Son aspect rationnel devrait la rendre motivante auprès d'ingénieurs de conception de systèmes et de pilotes formés aux sciences dites exactes.

Elle est basée sur l'utilisation organisée de l'expertise opérationnelle de pilotes. Cette expertise se trouve évidemment chez les pilotes d'essais et chez les instructeurs navigants. Mais sa disponibilité ne se trouve pas uniquement dans la population des pilotes en activité. La prise de retraite se passant relativement tôt pour eux, le recrutement des « super-experts » nécessaires est relativement aisé dans le lot des « jeunes retraités ». Une formation de base sur les méthodes d'analyses psychologique et cognitive est aisément envisageable.

Bien que non étudiée dans des situations hors aéronautique, elle devrait pouvoir s'appliquer partout où l'humain est confronté aux situations inattendues nécessitant une réaction immédiate, dans la conduite automobile par exemple.

De fait la réflexion nécessitée par la thèse a conduit à trouver des applications opérationnelles concrètes à des notions virtuelles théoriques, telles que les agents et leurs fonctions cognitives. Ce n'est peut-être pas le moindre résultat.

8.3 – POURSUITE DE LA RECHERCHE ET DU DEVELOPPEMENT DE LA METHODE

Malgré l'apport considérable des « super-experts » consultés, les résultats obtenus mériteraient d'être consolidés et prolongés par des travaux en laboratoire utilisant des moyens de mesure tels que l'oculométrie, et par le rapprochement avec des laboratoires de psycho-neurologie utilisant l'IRM fonctionnelle.

Il paraît certain qu'une telle approche permettrait d'approfondir les connaissances en comportements cognitifs élémentaires, base de compréhension des comportements opérationnels complexes (Just, Carpenter, & Miyake, 2003).

Le rôle de la mémoire court terme dans les phénomènes soudains et de faible durée mérite d'être approfondi.

Les travaux de neuro-imagerie sur les aires du langage montrent bien une direction d'études prometteuse (Dehaene, 2006).

Nous pensons que la poursuite de la recherche vers ces comportements cognitifs élémentaires de durée allant de quelques dixièmes de seconde à quelques secondes, aussi bien pour les perceptions sensorielles où il existe déjà beaucoup de résultats quantitatifs et qualitatifs, que pour les diagnostics, décisions et actions, ouvrira le champ de la connaissance quantitative et qualitative des possibilités et surtout des limitations cognitives opérationnelles humaines. Nous sommes persuadés que ce travail devrait être conduit par un laboratoire, à définir.

L'un des axes de recherche devrait être celui mentionné au Chapitre 7.3.5, de l'introduction des probabilités d'occurrence des comportements élémentaires (microscopiques) dans une population de pilotes.

Un autre axe de recherche, évoqué plus loin, est celui de l'accès à l'information nécessaire au pilote par le biais de l'utilisation de présentations permettant une plus rapide et plus sûre conscience de situation que celle obtenue avec les présentations actuelles basée sur une symbologie paramétrique, traditionnellement déduite pas à pas d'une évolution technologique de 60 ans.

Un moyen de réduire les temps de diagnostic et de décision tout en diminuant les risques d'ambiguïté et d'erreur serait la possibilité de présenter directement des concepts (au lieu de les acquérir au travers de processus compliqués de combinaisons de multiples paramètres), comme le font par exemple le langage des signes des sourds-muets ou l'écriture par idéogrammes. Une telle méthode mériterait d'être évaluée. En convaincre les pilotes ne serait pas la moindre difficulté, mais cela ne devrait pas être un obstacle insurmontable.

Si l'on se réfère aux cas analysés dans la thèse, ces concepts pourraient concerner la situation de l'avion par rapport aux exigences de la phase de vol en cours, par exemple :

- la représentation globale de l'avion (incluant de façon synthétique les paramètres pertinents vitesse, assiette longitudinale, poussée, configuration, limitations, etc) et de sa trajectoire dans la phase d'interception d'altitude, ou dans son engagement involontaire vers le sol,*
- la représentation de la situation de l'avion par rapport aux tolérances admises sur l'accélération au décollage pour un état de piste donné, ou sur celles de décélération à l'atterrissage,*
- le positionnement global de l'avion par rapport à l'axe de descente,*

Le canal « d'entrée » cognitive principale qu'est la vision est de mieux en mieux connu, mais les connaissances nouvelles devraient être combinées à celles des comportements cognitifs opérationnels élémentaires pour une optimisation des interfaces homme-machine. Cette approche devrait permettre à l'oculométrie d'apporter une contribution considérable à l'étude rationnelle de ces interfaces, surtout avec l'apport des résultats de recherches sur la modélisation dynamique de l'attention visuelle (Andrieu, Dehais, Lesire, Izaute, & Tessier, 2008).

8.4 – CONSEQUENCES DE L'EXISTENCE DE LA FONCTION COGNITIVE DE BASE

8.4.1 – Nécessaire prise en compte

L'occurrence de situations soudaines, inattendues, évoluant rapidement et dangereusement est relativement fréquente dans la vie professionnelle d'un pilote, et on n'en entend que peu parler car ces situations sont en général correctement traitées. Le taux d'accidents⁶ et d'incidents graves est faible mais leurs conséquences sont de moins en moins tolérées, principalement par l'augmentation de la capacité des avions et celle du nombre de vols (les deux augmentant le nombre de victimes potentielles) et par le rejet de tout risque par la société.

Cependant le nombre d'incidents (annuellement des milliers) ne débouchant sur aucun dommage, mais potentiellement dangereux, est considérable et le traitement de leurs causes, dont opérationnellement les $\frac{3}{4}$ sont humaines, n'est pas aisé.

Ces raisons militent en faveur d'une meilleure connaissance de ces causes. La thèse ayant mis en lumière certaines limitations humaines, il est normal qu'on essaie d'en tenir compte.

Nous rappelons que nous n'avons pas traité les situations de pannes soudaines de systèmes ou d'utilisation des conduites automatiques. Il est cependant probable que les phénomènes cognitifs entrant en jeu dans les secondes suivant l'évènement déclencheur seraient identiques. Par exemple les études des cockpits hautement automatisés montrent que les problèmes de comportement basiques restent les mêmes devant l'inattendu (Irving, 1994; Pinet, 1996).

⁶ Environ un accident avec victimes par 1.500.000 de décollages dans le monde (statistiques NLR 2010)

Dans ce Chapitre nous traiterons d'abord en 8.4.2 une constatation tirée de la nature même des situations étudiées.

Puis nous traiterons en 8.4.3 et 8.4.4 les conséquences associées à l'existence de la fonction cognitive de base surgissant à l'apparition de la situation imprévue. Les résultats, les dénominateurs communs des comportements, exprimés dans les hypothèses du Chapitre 7, sont résumés de façon opérationnelle en 4 points que nous reprenons ici comme base d'analyse des conséquences, avec quelques redites nécessaires.

8.4.2 – L'avion meilleur que le pilote

Il ne s'agit pas ici de mettre en doute la grande habileté et la haute compétence des pilotes (l'auteur ne trouve aucune raison à le faire). Cependant il est démontré que la satisfaction des complexes équations de la mécanique du vol, simultanément dans les 6 systèmes évoqués dans le Chapitre 2, est mieux obtenue avec des équipements automatiques adéquats. Cela pour une raison évidente : ces équipements fonctionnent en continu et sans état d'âme avec des entrées paramétriques continues et précises (vitesse, hauteur, accélérations, etc.) alors que les humains pour les mêmes fonctions sont obligés d'interpréter les données paramétriques et de les utiliser de façon hachée et discontinue, suivant l'opportunité de l'instant, pour satisfaire une évolution continue résultant de ces interventions discontinues.

Il y a cependant quelques restrictions à ce constat.

- Les systèmes matériels fonctionnent à l'intérieur de limitations technologiques imposées par leur définition et leur construction. L'évolution technologique permet aujourd'hui l'utilisation des automatismes dans des domaines de plus en plus nombreux, mais avec des limites imposées par leurs possibilités physiques. Par exemple l'atterrissage entièrement automatique est possible dans des situations difficiles mais pas avec des vents de travers élevés.

En revanche des automatismes fiables sont de plus en plus utilisés, comme sur l'A380 par exemple, pour des fonctions où leur utilisation est techniquement possible.

- Des drones capables de porter des centaines de passagers seront probablement matériellement possibles dans quelques décennies dans des domaines de vol bien répertoriés, mais seront-ils acceptés psychologiquement par les éventuels passagers, alors que le nombre de combinaisons de situations critiques (pannes, météo, propagation radioélectrique, etc.) est infini ? On n'a pas encore trouvé mieux que le cerveau humain pour s'adapter à l'imprévu, avec cependant des limitations dont celles mises en lumière par cette thèse.

- Le président d'une compagnie aérienne⁷ a prévu qu'il serait possible de n'avoir qu'un seul pilote dans le cockpit des avions de transport. Compte-tenu de la faible fiabilité humaine de 10^{-3} à 10^{-4} par heure de vol, cela revient à dire que dans ce cas les avions devraient être entièrement automatiques pour accéder à une probabilité d'accident meilleure que 10^{-7} par heure de vol.

⁷ Ryanair

8.4.3 – Prise en compte de la fonction cognitive type de base

Il s'agit essentiellement de l'ensemble des recommandations du Chapitre 7.4 que nous ne réécrivons pas ici malgré quelques redites nécessaires.

Les problèmes qui y sont traités ont fait l'objet de nombreuses publications, comme les diagnostics, les prises de décision, le contrôle et la gestion des risques (Patrick & Boreham, 1996 ; Schneider, 1994 ; GDR 2009), mais là-aussi pour des durées largement supérieures à celles concernées par la thèse. Nous préférons donc considérer nos propres recommandations dont certaines recouvrent celles préconisées par ailleurs.

Ces recommandations concernent en priorité l'éducation des pilotes aux conditions de stress, et la présentation correcte des éléments lui permettant une perception immédiate de la nouvelle situation.

8.4.4 – Synthèse des actions souhaitables

Les actions souhaitables repérées dans le Chapitre 7.4 sont reprises par secteurs principaux classiques d'intervention :

- la conception des interfaces pilote/avion,
- la répartition des tâches et les procédures,
- l'éducation/formation,
- la sélection.

Pour qu'elles soient entreprises, car les répercussions financières ne sont pas négligeables, il faut d'abord les considérer nécessaires. C'est-à-dire que les conséquences malheureuses d'accidents possibles doivent être estimées valoir les dépenses faites pour les prévenir, ce qui n'a rien d'évident avec l'actuel faible taux d'accidents, et avec la multitude de « recettes » de tous genres destinées à réduire l'occurrence des erreurs et mauvaises décisions. C'est d'ailleurs cet aspect de « multitude » qui milite en faveur d'étude de structures synthétiques permettant la simplification des actions nécessaires à la gestion du vol.

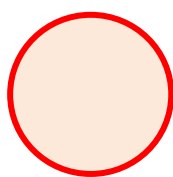
Interfaces

Le problème essentiel est la saisie cognitive immédiate d'une perception correcte de la situation soudaine. C'est la prise en compte rapide de la conscience de situation, ou plutôt de la perception de la situation réelle.

Notre démarche concerne d'abord les perceptions visuelles des instruments présentant les paramètres nécessaires à la bonne compréhension de la situation. Ce sont d'abord le Primary Flight Display (PFD) qui concentre les données essentielles au pilotage court terme, le Navigation Display (ND) qui donne la projection horizontale de la trajectoire à moyen terme de l'avion, le Vertical Display (VD) qui donne la projection de la trajectoire à moyen terme sur un plan vertical.

Les deux premiers, correspondant à l'A330, sont présentés ci-après. Bien que ces instruments représentent une amélioration considérable des perceptions visuelles, on voit sans grand discours (nécessité de regarder, trier et de combiner rapidement 30 à 50 paramètres différents) qu'il est encore nécessaire d'améliorer le système, malgré l'ergonomie exceptionnelle adoptée.

D'après la position des yeux du pilote dans le cockpit le cercle ci-dessous représente à l'échelle du texte la surface de vision focalisée sur ces instruments lorsque la vision périphérique n'est pas prise en compte par la perception dans le cas de focalisation de l'attention sur un paramètre. La superposition de ce cercle sur la figure suivante donne la surface exploitée par une vision focalisée, loin d'embrasser l'ensemble d'un écran.



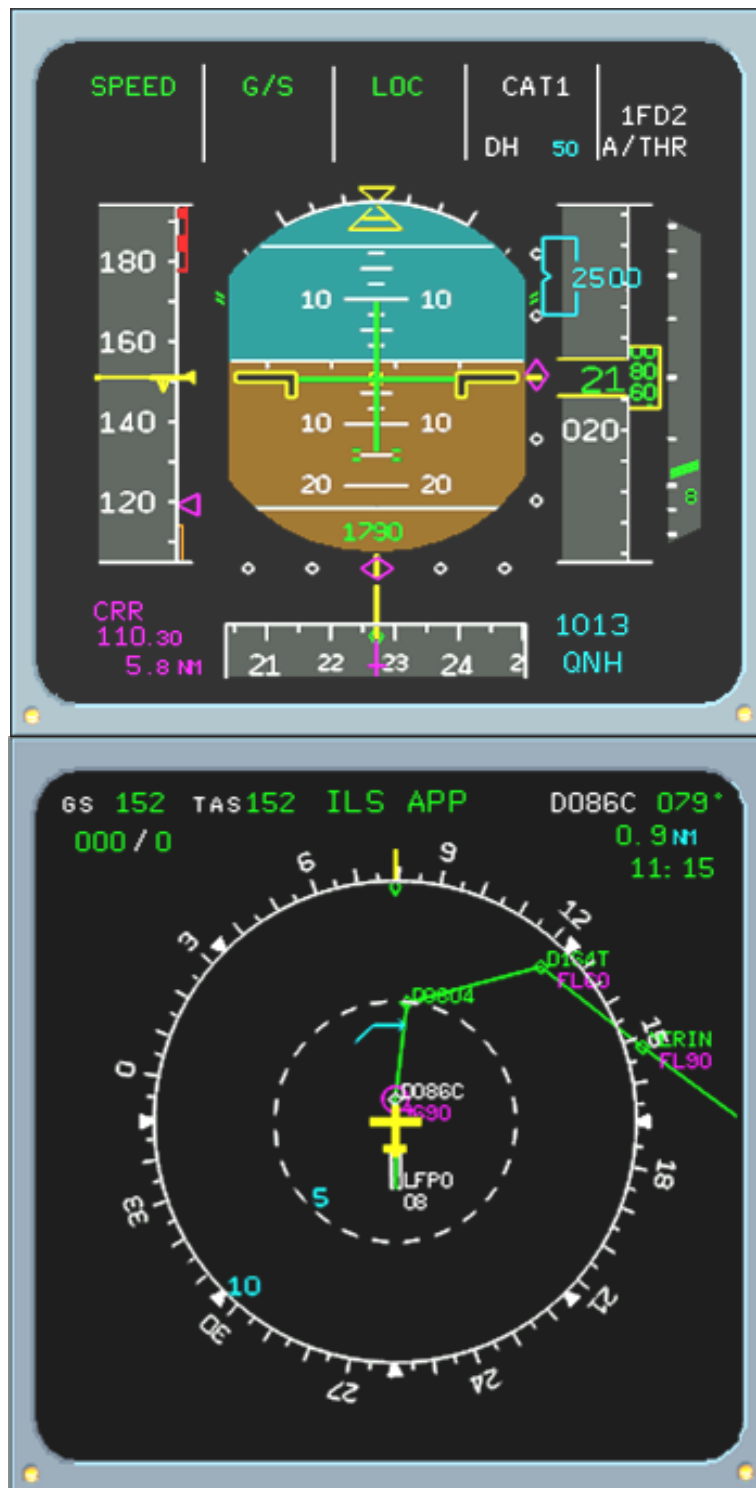


Figure 13 : Exemple de figurations PFD et ND en approche

L'amélioration ergonomique des instruments ne devrait pas porter uniquement sur une meilleure présentation des paramètres mais aussi et surtout sur la révision de l'ensemble des paramètres pertinents au pilotage à court terme, et sur leur synthèse pour présenter au pilote sa situation présente au sein des 6 systèmes physiques (Chapitre 2) qu'il doit mentalement se représenter : environnement et configuration aérodynamiques, propulsion,

atmosphère (météo), environnement géographique (trajectoire et obstacles), trafic (autres avions), systèmes avion (automatismes). La présentation synthétique peut s'éloigner de celle des paramètres classiques présentés sur les PFD et ND. Une étude orientée vers la compréhension intuitive et immédiate de la situation complexe présente est à mener sans a priori.

La figuration directe de concepts pourrait être un chemin à explorer (utilisée dans le langage des signes des sourds-muets ou dans les idéogrammes).

Pour revenir à un cas concret nous pouvons évoquer le cas analysé n°1, la perte de contrôle en remise de gaz. Le pilote n'a pas pu « intégrer » les équations de la mécanique du vol pour des raisons de surprise, d'évolution rapide de la situation et de focalisation de l'attention. Il a totalement ignoré la correspondance physique qu'il connaissait bien entre les paramètres pertinents, pourtant directement disponibles à sa vue (poussée, vitesse, assiette longitudinale, vitesse verticale), car cette correspondance ne lui était pas présentée de façon simple et immédiate dans une situation de stress exigeant le traitement simple et rapide de perceptions exactes. Ainsi la présentation ergonomique très évoluée du PFD, ayant servi sans problème à des dizaines de milliers de pilotes pendant des millions d'heures de vol, lui a causé un problème majeur.

C'était un pilote normal apparemment sans problème particulier, dans une situation initialement sans problème anormal. Son cas est-il unique ? Il est heureusement peu fréquent mais pas unique d'après les comptes-rendus d'accidents et d'incidents.

On pourrait évoquer de la même façon les quatre autres cas analysés.

Les solutions ne sont certes pas immédiates : comment rendre simples, rapides et non ambigus la présentation et le traitement de combinaisons complexes de paramètres ?

A titre d'exemple on donne ci-après l'image expérimentale d'une figuration de trajectoire en 3 dimensions près d'obstacles naturels permettant une conscience immédiate de la situation de la trajectoire par rapport aux obstacles naturels.

Le système en question, appelé GARD, a été développé et breveté au début des années 2000⁸. Il n'est pas utilisé en Europe, mais un système similaire a été certifié aux USA⁹.

⁸ Développé à partir du projet V4L développé par Cinq Demi

⁹ Par Universal Avionics pour l'aviation d'affaire

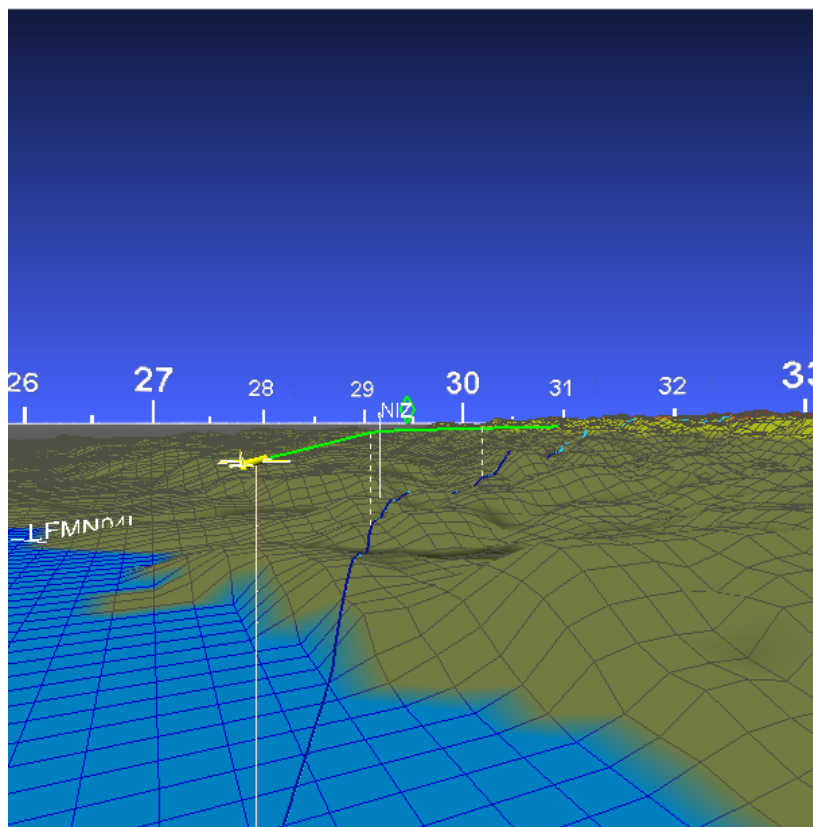


Figure 14 : Exemple de figuration exocentrique 3D de trajectoire

Cependant une remarque est à faire sur la présence sur la même image visualisée de symboles de paramètres de conduite (vitesse, assiettes, énergie totale, cap, etc) et d'une vue de l'extérieur, comme les présente le HUD (Head Up Display). La présence d'une vue égocentrique¹⁰ de l'extérieur comme celle du HUD n'exclut pas le phénomène d'effet tunnel sur les paramètres de conduite. Des travaux sur ce type de présentation ont montré la nécessité de prendre des précautions dans la localisation visuelle des paramètres de conduite pour diminuer l'occurrence de l'effet tunnel (Dowell, Foyle, Hooey, & Williams, 2002).

Tâches et procédures

Les raisons de l'équipage à deux pilotes dans l'aviation de transport sont :

- la faible fiabilité physiologique de l'humain,
- la nécessité de répartir harmonieusement les tâches à exécuter au cours de l'ensemble des phases de vol,
- l'aide et le contrôle mutuels dans le cockpit.

¹⁰ Une vue égocentrique a son axe parallèle à celui de l'avion. Une vue exocentrique comme celle de la figure 14 a son axe différent de celui de l'avion

Ainsi que dit précédemment dans un équipage à deux le rôle du pilote non en fonction (PNF) est primordial dans sa tâche de surveillance des situations et de détection des anomalies. Cependant il faut noter que ce PNF a, pour de nombreuses raisons, des tâches spécifiques à mener et que son attention est loin d'être prise à 100% par cette fonction de contrôle (voir cas n°1). Ainsi en pratique la formation du PNF est beaucoup plus axée sur l'enseignement de ses tâches spécifiques en équipage à deux que sur cette fonction de contrôle, malgré l'introduction de cours obligatoires de CRM, « Crew Resources Management »¹¹, où l'on essaie d'apprendre à s'entraider entre pilotes (Deharvengt, 2007).

Un autre cas préjudiciable à cette fonction de contrôle est celui où le PNF est le commandant de bord, lorsque ses responsabilités de commandement prennent le pas sur ses fonctions de contrôle et rendent incompatibles ses tâches de PNF, au détriment de la répartition des tâches en équipage car alors le pilote en fonction (PF), le copilote, doit exécuter seul l'ensemble des tâches prescrites aux deux (voir cas n°2).

Ainsi la répartition des tâches dans le cockpit ne doit pas correspondre seulement à des impératifs techniques mais doit intégrer la fonction de contrôle réciproque dans toutes situations, et considérer les incompatibilités éventuelles de fonctions.

Pour toutes les procédures d'urgence les bureaux d'études doivent concevoir les systèmes pour qu'elles soient simples et rapides, si possible intuitives (principe d'« affordance »¹²).

Mais de toute façon il est impossible aux pilotes d'utiliser les checklists et procédures en toutes circonstances ainsi que démontré par une étude Eurisco (De Brito, Pinet, & Boy, 1998). La concomitance de plusieurs tâches prioritaires amène des oublis, et la complexité des procédures est source de durée parfois prohibitive dans leur exécution (Loukopoulos, Dismakes, & Barshi, 2009).

Education / Formation

Education ou formation ?

Il y a de multiples interventions dans la formation des pilotes, la plupart ayant trait aux questions techniques, certaines concernant à la fois des problèmes techniques et de comportement, très peu concernant uniquement le comportement, le tout prodigué par différents organismes. Mais les questions techniques et comportementales sont intriquées, et il est donc difficile de différencier ce qui relève de l'éducation, le comportement, de ce qui relève de la formation, l'exécution des procédures et des règles.

¹¹ La formation au CRM a été introduite dans les compagnies aériennes au début des années 1980. Elle fait partie de la formation en qualification de type de tous avions Airbus dès 1985 chez Aéroformation puis chez Airbus Training

¹² La seule présentation d'une commande ou d'une figuration suggère par elle-même l'action souhaitée

Il faut mentionner que les militaires ont expérimenté avec succès une méthode de formation aux prises de décision rapide (Li & Harris, 2008). En dehors de l'aéronautique un récent article sur les phénomènes d'anticipation et de reconnaissance dans des domaines d'évolution dynamique et sous contrainte (sport et jeu d'échecs) conclut que les experts en ces domaines et en d'autres (par exemple les pilotes en aviation) doivent recevoir une formation adaptée : « ...our findings may have benefits when considering how best to develop training programmes that facilitate the acquisition of decision-making skills. » (North, Ward, Ericsson, & Williams, 2011, p 166)

Pour la thèse nous parlerons d'éducation au sujet de la fonction cognitive type de base, et de formation au sujet des perceptions et des modèles mentaux qu'elle utilise.

Cette éducation devrait s'effectuer dès la formation de base dans les centres « ab initio ». Un tel programme doit débiter très tôt dans la formation des pilotes et doit être récurrent pour à la fois compenser l'évaporation mnésique et augmenter l'expérience, ce qui pose la question des coûts de formation.

Quelques rappels

Depuis le début de l'aviation la formation des équipages, des pilotes en particulier, a été essentiellement technique. L'éducation de leur comportement en était la conséquence, afin de limiter les causes d'accidents et d'améliorer les performances du système. Des règles ont vu le jour, le plus souvent imposées par des règlements officiels accompagnant l'évolution des contraintes incontournables. Cette éducation incluant de facto les comportements adaptés a fini par devenir une véritable « culture aéronautique » admise de tous, mais pas forcément pratiquée partout.

On peut distinguer cinq pas essentiels dans l'évolution de la formation des équipages.

- Au cours de la Seconde guerre mondiale, les USA ont mis au point une méthode de formation pour traiter les dizaines de milliers d'équipages nécessaires à la maîtrise aérienne. C'était l'enseignement du « need to know », du nécessaire à être connu, de façon à réduire la formation au strict nécessaire. L'aviation civile a débuté son utilisation à la fin des années 1960.*
- Puis la technologie le permettant, on a utilisé des simulateurs de vol autorisant à moindre frais et en toute sécurité d'enseigner les corrections de pannes dangereuses. Ils sont dès le début des années 1970 devenus les éléments majeurs d'un autre principe pédagogique, la formation par la pratique.*
- Le comportement en tant que tel a été pris en considération au début des années 1980 par l'introduction du CRM, « Crew Resources Management », pour enseigner la coopération au sein des équipages, en instituant rapidement des exercices opérationnels de formation sur simulateur de vol, les LOFT, « Line Oriented Flight Training ». De plus le comportement des pilotes a été officialisé dans l'enseignement des Qualifications de type des Airbus dès 1985, devenu ainsi à la fois technique et humain.*
- Enfin la technologie numérique ayant hautement favorisé les automatismes de conduite de l'avion et de ses systèmes, l'étude du comportement dans le cockpit a été officialisée aux années 1980 dans les bureaux d'études des grands constructeurs.*
- Dernier pas, celui de la « bureautique » désormais depuis l'A380 pleinement introduite dans les cockpits en parallèle de l'automatisation des équipements, censée favoriser les tâches dévolues aux pilotes.*

Depuis 20 ans on s'est principalement occupé d'améliorer ce qui existe grâce aux progrès de la technologie, les principes de formation étant jugés satisfaisants pour l'évolution des opérations aériennes et pour celle des nouveaux matériels.

La technologie galopante modifie constamment les matériels aéronautiques. Comme les avions ont une vie opérationnelle supérieure à 20 ans, les flottes mondiales sont un mélange de types et de versions très différents suivant la période de leur mise en service et l'évolution technologique de leurs équipements. Ce phénomène est préjudiciable à l'établissement de standards mondiaux de formation des pilotes, aussi bien pour les règlements régissant les programmes que pour les programmes eux-mêmes. En conséquence les écoles de début (« ab initio Training ») sont constamment à la traîne derrière les permanentes innovations des grands constructeurs aéronautiques. Ce fait impose à ces derniers de se consacrer à la mise à niveau des pilotes qu'ils reçoivent en formation sur leurs derniers types d'avions. D'où un mélange de responsabilités dans la formation et un inévitable retard structurel des règlements (nationaux et internationaux) en définissant les minima de compétence ou les moyens et les programmes à adopter.

Cependant les utilisateurs, les compagnies aériennes, ont en dernier ressort la responsabilité de la compétence de leurs pilotes : (1) de leurs licences de base acquises dans les écoles de début, (2) de leurs qualifications sur les types d'avions qu'ils conduisent, acquises soit dans les centres de formation de la compagnie soit chez le constructeur de l'avion, (3) de l'entretien périodique de leurs compétences opérationnelles effectué en général dans les centres de formation de la compagnie.

Les interventions de l'éducation concernent la maîtrise de soi lorsqu'intervient une situation inattendue et soudaine, stressante, pour prendre le temps d'un diagnostic fiable, pour choisir l'action appropriée, et enfin pour contrôler la validité de l'action lancée.

Cette prise en compte du stress doit s'appuyer sur l'enseignement de principes simples et de bon sens (par exemple coupure des systèmes automatiques si l'on ne comprend pas ce qu'ils font, retour en vol rectiligne et horizontal en cas de manœuvre mal contrôlée).

Un exemple de principe simple et aisé à retenir parce que de bon sens est le rappel de règles enseignées par Airbus Training dans l'utilisation des automatismes des avions de la famille Airbus, appelées « GOLDEN RULES » (Pinet, 1996):

- 1. The aircraft can be flown like any other aircraft.*
- 2. Fly, navigate, communicate – in that order.*
- 3. One head up at all times.*
- 4. Cross check the accuracy of the FMS.*
- 5. Know your FMA at all times.*
- 6. When things don't go as expected – TAKE OVER.*
- 7. Use the proper level of automation for the task.*
- 8. Practice task sharing and back-up each other.*

Le meilleur moyen pour ce type d'éducation est le simulateur de vol où l'on introduit dans un vol normal simulé des situations imprévues a priori inconnues de l'équipage. Les scénarios doivent être très diversifiés, l'important étant le traitement correct de la situation. Ce type de séance existe aujourd'hui pour enseigner le bon comportement en équipage, ce sont les

séances de LOFT. Mais il s'agit d'aller au-delà, vers l'éducation de la réduction des temps de réaction, de la justesse des diagnostics et des choix adoptés.

Il est impossible de traiter en formation toutes les situations et combinaisons de situations possibles, et il est donc nécessaire d'éduquer le pilote de façon générale pour lui apprendre à gérer rapidement et correctement toute situation inattendue et soudaine. En fait on doit l'éduquer au traitement sous stress de situations quelconques, à la maîtrise de soi, en choisissant de préférence des catégories de situations pouvant être subies dans la réalité, présentées dans un environnement adapté.

Il est nécessaire que l'évènement choisi ne soit pas uniquement une panne de système de l'avion, ce cas étant traité de façon classique et spécifique dans les qualifications de type sur un nouvel avion. Mais il doit être choisi parmi les milliers de combinaisons de situations enregistrés dans les retours d'expérience à la disposition du monde aéronautique, et surtout il ne doit pas être connu à l'avance par l'équipage en instruction. La technologie actuelle de la simulation autorise de tels programmes.

Il faut aussi enseigner les tâches complexes sous stress si l'on veut que le sujet réagisse correctement en situation réelle sous stress en particulier contre le phénomène d'effet tunnel. Cette procédure permet de pouvoir réagir correctement dans une situation réelle, mais pas forcément identique à celle enseignée.

L'éducation du rôle de contrôle du pilote non en fonction (PNF) est importante dans ces séances.

Les résultats corrects ne sont pas forcément immédiats, et ils doivent être contrôlés périodiquement pour tenir compte de l'évaporation mnésique.

Indépendamment de cette éducation générale et non spécifique, il est nécessaire de former les pilotes aux actions particulières sur un type d'avion donné, en récupération de situations qu'on connaît délicates (par exemple panne au décollage, embarquement incontrôlé en roulis, panne générale des systèmes anémométriques).

Ces séances augmentent l'expérience, même au simulateur. Il faut donc prendre garde qu'elles n'introduisent pas des comportements « parasites » (par exemple dus à certaines pratiques propres à la simulation comme les recalages rapides de configurations).

Sélection

Enfin il serait bon de revoir la sélection initiale des pilotes car la maîtrise de soi sous stress peut se conforter mais ne peut que difficilement s'acquérir uniquement en école. Dans un monde où la tendance est de diminuer la compétence nécessaire à la conduite des avions par l'utilisation d'automatismes de plus en plus complexes pour des raisons économiques, et où les organisations professionnelles sont très conservatrices, s'attaquer à une nécessaire sélection initiale, associée à un suivi au cours de la carrière, est une gageure de taille !

Cependant piloter un avion n'est pas à la portée de tout le monde et quand il s'agit de sélectionner une population de 500.000 personnes seulement à qui l'on confie l'existence de centaines de millions d'autres personnes, on peut se permettre un minimum d'exigence de sélections particulières.

9 – EXEMPLE D'APPLICATION DE LA METHODE

9.1 – OBJECTIF

Le modèle cognitif défini dans le Chapitre 4 et utilisé aux analyses de l'Annexe 2 peut être aussi utilisé à d'autres fins que l'analyse d'incidents et d'accidents, pourvu que les hypothèses de base soient respectées : évènement de courte durée (inférieure à la minute), situation dynamique nécessitant une attention soutenue. Il permet de mettre en valeur les phénomènes cognitifs internes dans l'analyse de phénomènes courants complexes, en situations normales et anormales, dans la conception de matériels et de systèmes et dans leur utilisation opérationnelle.

On peut donc l'utiliser au stade de la conception des systèmes et de leurs procédures d'utilisation. Ce Chapitre 9 donne un exemple concret d'utilisation.

Cependant sa mise en application nécessite l'apport d'une expertise opérationnelle et donc la confirmation par plusieurs experts de la validité de l'expertise utilisée. Cette procédure peut remplacer dans beaucoup de cas de façon efficace une expérimentation statistique à l'aide d'un nombre important de sujets « cobayes ».

Le modèle devrait se prêter aisément aux expérimentations utilisant les mesures oculométriques.

9.2 – CAS TRAITE

Arrondi d'atterrissage d'un avion de type A340-600 en pilotage manuel

9.2.1 – Introduction

Au préalable nous pouvons avancer que cette manœuvre courte et très dynamique, même pratiquée des milliers de fois, n'est jamais « standard » pour un pilote. Chaque retour sur terre est un cas particulier, certes présentant de nombreuses similitudes avec les précédents, mais nécessitant une attention soutenue et la pleine conscience de la situation. La durée de la phase de vol étant inférieure à 30 sec, la méthode peut s'appliquer. Dans une brève période de temps et pour des manœuvres requérant attention et compétence opérationnelle on est quasiment sûr que les actions cognitives sont entièrement consacrées aux tâches lancées sans dérive sur d'autres sujets.

9.2.2 – Méthode d'analyse

C'est celle décrite au Chapitre 4.7.

Modèle cognitif

Il présente le système pilote-avion-piste en pilotage manuel dans l'arrondi (voir Figure 15 en page suivante). Les agents cognitifs AP1 et AG1 sont une représentation fictive des parties conscientes du cerveau du pilote utilisées dans cette phase de vol. AP1 est l'agent principal qui gère, diagnostique, décide et contrôle. Il définit les objectifs et délègue les tâches correspondantes de pilotage manuel à l'agent AG1 spécialisé dans cette fonction. Ce dernier utilise alors une fonction cognitive complexe prenant comme entrées les perceptions visuelles, auditives et sensorielles adéquates et comme sorties les mains (manche et sélecteurs) et les pieds (palonnier et freins). Ces sorties concrétisent les actions correspondant aux tâches assignées, pas forcément identiques à ces tâches requises.

Séquences

L'avion et son environnement sont soumis à l'écoulement du temps physique.

Le pilote est soumis évidemment aussi au temps physique mais son comportement dépend de son temps interne, psychologique et cognitif. Une action peut sembler plus ou moins longue suivant sa perception. Afin de relier les deux types d'écoulement du temps on sectorise la phase de vol à analyser en segments temporels, en séquences, dont les bornes sont observables objectivement et qui correspondent à des tâches définies.

Ainsi pour l'arrondi nous découpons la manœuvre en 4 éléments temporels (spatio-temporels exactement) correspondant à des phases aisément définies de tâches cognitives :

- (1) avant 100 ft de hauteur,
- (2) en dessous de 100 ft et jusqu'à 50 ft,
- (3) de 50 ft à 20 ft,
- (4) de 20 ft au sol.

La hauteur est la distance entre le train d'atterrissage principal et le sol mesurée par le radioaltimètre.

Plan de l'analyse

Il diffère légèrement du schéma du Chapitre 4.7 car il ne s'agit pas ici de l'analyse d'un exemple passé et enregistré. Pour chacune des séquences nous traiterons successivement les :

- a - description de la tâche et de ses objectifs
- b - perceptions
- c - fonctionnement cognitif de base
- d - analyse des dérives éventuelles constatées

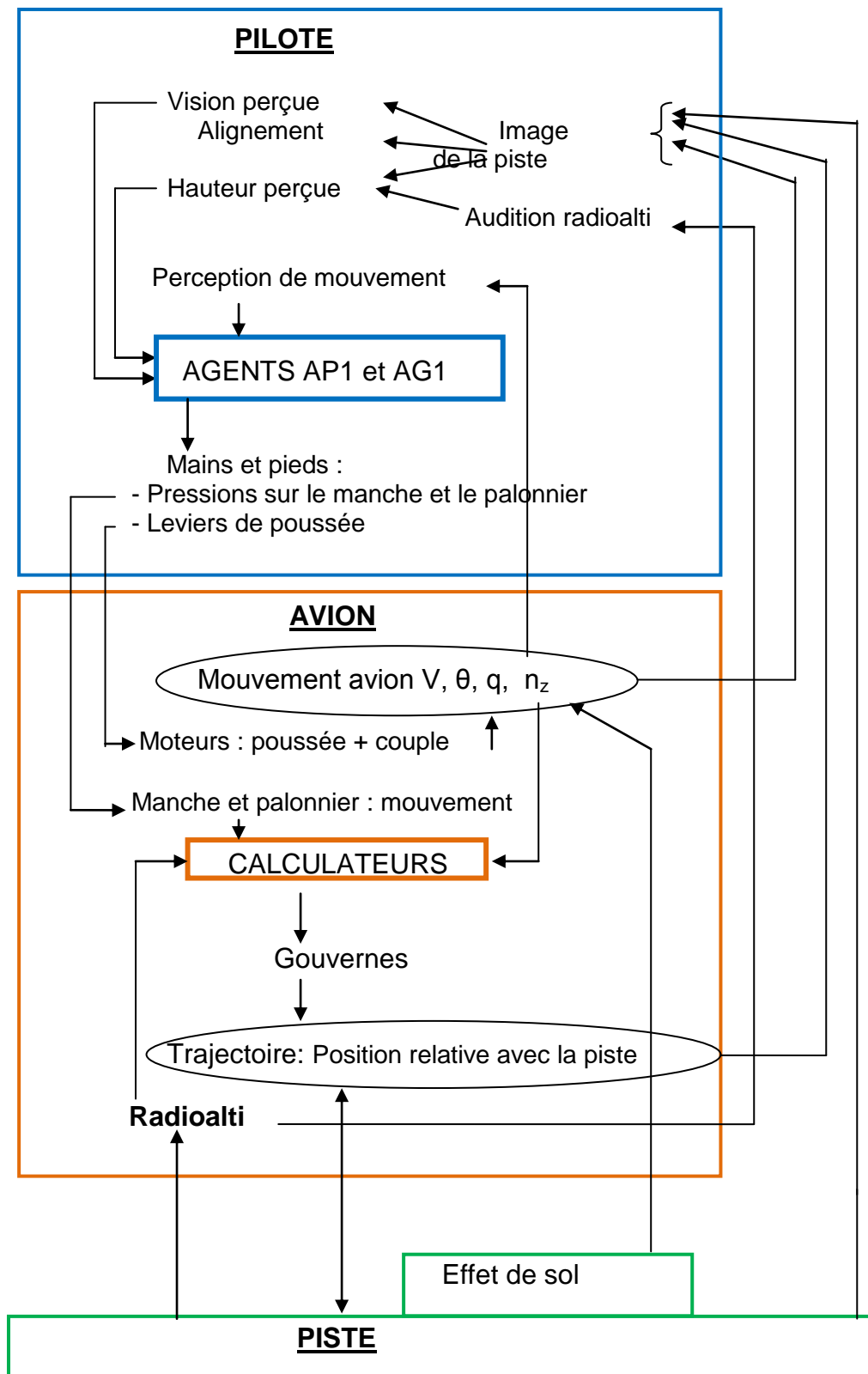


Figure 15 : Schéma fonctionnel de pilotage manuel à l'atterrissage

9.2.3 – Analyse

1 – Données de base (hypothèses de travail)

L'avion choisi est du type A340-600, dont les dimensions et l'allongement du fuselage présentent des caractéristiques intéressantes pour le pilotage.

Les hypothèses opérationnelles sont les suivantes.

La vitesse d'approche est régulée par l'Autothrust et il n'y a pas de HUD (Head Up Display).

Le train est sorti, les hypersustentateurs sont placés sur le cran 4 (plein sortis).

Vent au sol de 15 kt plein travers, turbulence faible, bonne visibilité de la piste.

Pour un A340-600 les valeurs moyennes en approche sont les suivantes :

- Vapproche (VC, vitesse conventionnelle, assimilée ici à la vitesse air réelle) de 145 à 160 kt suivant la masse d'atterrissage, soit environ 70 à 80 m/sec (pour Concorde Vapproche était environ 160 kt, assez proche) ;

- assiette longitudinale moyenne Θ de 1,5 à 4,5° ;

- incidence α de 3 à 6° ;

- vitesse verticale moyenne Vz en approche de 700 à 800 ft/min soit 3,5 à 4 m/sec.

- correction de dérive de 4° en cap (correspondant au vent de travers).

Les limitations au toucher sont Vz < 3 m/sec et Θ < 8,5°.

L'analyse est faite pour une pente γ autour de 3°.

La manœuvre de l'arrondi, de 100 ft au sol, dure en général moins de 15 sec.

Les références de l'analyse porteront sur les valeurs moyennes observées sur l'avion.

Les valeurs numériques citées ont été tirées de documents non officiels et sont donc à considérer avec prudence.

L'analyse du comportement opérationnel est celle du PF, pilote en fonction ou « pilot flying ».

2 – Equilibre des forces et moments

Si l'on observe les forces et les moments dans le plan vertical à l'arrondi on a :

- la portance qui équilibre le poids plus la force d'inertie due au facteur de charge de l'arrondi ; la vitesse diminuant, la diminution de portance est compensée par l'augmentation de l'incidence α commandée par le cabrage piloté, et par l'effet de sol venant diminuer cette action de cabrage ; le cabrage piloté (action à augmenter l'assiette longitudinale Θ par pression sur le manche) chargé de l'équilibre des forces a pour objectif l'annulation de la vitesse verticale Vz, à l'impact ;

- le moment de tangage qui est équilibré par la somme des 3 moments piqueurs (dus à la réduction de vitesse, à la réduction des moteurs, et à l'effet de sol), et de celui du braquage des gouvernes ; cet équilibrage est obtenu aussi par la manœuvre pilotée du manche en cabrage.

Donc le cabrage comporte 2 éléments distincts liés par une manœuvre unique et continue.

En latéral l'avion est supposé piloté stable ailes horizontales avec une correction de dérive de 4° (à droite ou à gauche suivant la direction du vent), jusqu'à la manœuvre de « décroche » consistant à aligner l'axe de l'avion avec celui de la piste juste avant le toucher des roues.

3 - Description sommaire de l'arrondi

Il débute entre 100 et 50 ft de hauteur hz, suivant la pente γ et le vent. 50 ft est une bonne hauteur car elle correspond au passage normal du début de la piste, et au début d'une bonne perception de l'effet de sol. Ce dernier contribue à une légère augmentation de la portance et à un couple piqueur.

A partir de cet instant l'arrondi est normalement pour le pilote une manœuvre évolutive et continue d'une durée d'environ 8 à 10 sec jusqu'au toucher des roues, mais sans aucune stabilisation.

A 30 ou 20 ft (par expérience le plus souvent à 20 ft à l'annonce vocale automatique « RETARD ») le pilote réduit à fond les moteurs. Les conséquences sont une diminution de vitesse, avec obligation d'augmenter l'incidence et de contrer un couple piqueur d'autant plus marqué que le centrage est avant, et un autre couple piqueur dû à la position géométrique des moteurs sous l'aile. Cette augmentation nécessaire d'incidence α est en partie compensée par l'effet de sol augmentant la portance lorsque la hauteur au-dessus du sol diminue. L'effet de sol apporte aussi un couple piqueur.

L'objectif immédiat du pilote est de diminuer la vitesse verticale en même temps que la hauteur de façon à « tangenter » la piste. Cette manœuvre du type $V_z = K \cdot h_z$ (loi théorique $V_z = dh/dt = K \cdot h = C \cdot e^{-K \cdot t}$) oblige à incurver la trajectoire en même temps qu'augmenter l'incidence α et à compenser les 3 couples piqueurs. Donc elle oblige à donner un ordre à cabrer progressif pendant les 8 à 10 sec en question.

En réalité la V_{zi} à l'impact n'est nulle que très rarement. Pour des raisons de performances d'arrêt ou pour éviter l'aquaplaning il vaut mieux qu'elle ne le soit pas. Sa valeur moyenne est de 1 m/sec, avec une grande dispersion allant de 0 à 4m/sec.

Les informations radioaltimétriques verbales automatiques sont, à partir de 200 ft, données pour les hauteurs de: 200, 100, 50, 40, 30, 20, 10, 5 ft.

Entre 10 et 0 ft la manœuvre de décroche effectuée au palonnier amène l'axe de l'avion parallèle à celui de la piste, ailes gardées horizontales par braquage du manche en roulis.

Mais aussi 4 limitations opérationnelles sont à observer au toucher:

- 2 en tangage : $V_z < 3$ m/sec, $\Theta < 8^\circ$ environ,
- 2 en latéral : axe de l'avion parallèle à celui de la piste avec inclinaison latérale nulle ou très faible.

Pour la limitation d'assiette Θ un repère apparaît sur l'horizon artificiel sur la valeur limite autorisée.

4 - Problème constaté

Un problème constaté est une fréquence élevée d'atterrissages durs, amenant des vérifications de train d'atterrissage, par rapport aux atterrissages des A340 de fuselage moins long.

On regardera les déviations significatives de paramètres d'atterrissages en essayant de les expliquer.

5 – Approche finale (200 ft à 100 ft de hauteur hz)

a – description de la tâche et des objectifs

La durée de cette séquence est d'environ **8 sec.**

On essaie de stabiliser une trajectoire pour un toucher sur la partie de la piste repérée par des traits à 300m de son début (en l'absence de ces repères on estime visuellement un point sur la piste à 300m). Pour cela on commande avec le manche une action longitudinale de façon à stabiliser visuellement la trace fictive de la trajectoire actuelle sur le point visé (c'est le lieu où le mouvement relatif apparent de l'environnement semble nul, ou autrement dit c'est le point de rencontre du vecteur-vitesse avec la piste).

Pour contrer la dérive le cap de l'avion est stabilisé avec une correction de 4°, ailes horizontales.

Le passage à 100 ft est important. C'est pratiquement le point de transition entre l'approche finale et l'atterrissage

Cette sorte de fenêtre d'entrée est aussi le point de départ de la manœuvre finale d'arrondi. Ce dernier sera d'autant mieux géré que les paramètres de départ seront ceux des références habituelles standard dans la mémoire du pilote, et qu'ils seront stabilisés.

Ces paramètres standards correspondent à une approche stabilisée à 100 ft sur une pente γ de 3°. Cette pente est obtenue de diverses façons :

- avec un guidage radioélectrique de type ILS ou GPS, avec pilotage automatique, ou pilotage manuel avec ou sans directeur de vol ;
- avec un guidage optique de type VASI ;
- sans aucun guidage extérieur mais avec l'estimation du pilote grâce à la vision de la piste au travers du pare-brise ; nous traiterons ce dernier cas.

b – perceptions

Dans ce qui suit l'estimation de la position relative de l'avion par rapport à la piste est obtenue par l'utilisation complexe de l'ensemble de la vision extérieure à l'aide d'un modèle mental construit par l'expérience, prenant en compte la vision directe, la vision périphérique, l'image de la piste et de ses repères, la vitesse de déformation de cette image, le défilement du paysage, donc en dynamique la combinaison des repères et de leurs dérivées. Il en découle une perception de la position relative qui est traitée par le cerveau par un modèle mental MM approprié.

C'est la période où l'on vérifie sur les instruments les paramètres vitesse VC, assiette longitudinale Θ et vitesse verticale Vz pour ajustements éventuels, en rapport avec le passage proche du début de piste qu'on désire être à 50 ft de hauteur hz.

Normalement les efforts sur le manche sont en moyenne nuls, l'avion étant trimé (équilibré) pour la vitesse d'approche finale, la pente et le cap étant supposés stabilisés.

c – fonctionnement cognitif

L'agent fictif **AP1** gère l'ensemble de la manœuvre avec l'objectif de poser l'avion au bon endroit, et délègue la tâche du pilotage manuel à l'agent fictif spécialisé **AG1**. Ce dernier utilise simultanément pour cela 2 fonctions cognitives : FC1 pour le pilotage en site et FC2 pour le pilotage en azimuth. Cette séparation des tâches est enseignée dans la formation de base des pilotes et les commandes de l'avion y sont spécialisées.

- La fonction cognitive **FC1** de l'agent utilise les éléments suivants :

Entrées : écarts estimés visuellement ; annonce vocale des passages à 200 et 100 ft;

Sorties : - pression en longitudinal sur le manche avec un *dosage* fonction de la valeur estimée de l'écart et de la durée entre les informations du radioaltimètre entre 200 et 100 ft (qui donne le temps alloué pour l'action) ;

- évolution de l'avion donnant des informations visuelles évoluant en permanence ;

Contrôle et corrections : en fonction des écarts constatés.

- La fonction cognitive **FC2** utilise les éléments suivants :

Entrées : écart estimé visuellement avec l'axe de piste ; inclinaison latérale d'après les repères extérieurs ou vérifiée brièvement au Primary flight display PFD ;

Sorties : pression discontinue en latéral sur le manche pour conserver les ailes horizontales avec une correction de dérive stabilisée ;

Contrôle et corrections : par faibles variations de l'inclinaison latérale de l'avion en fonction des écarts constatés.

- Les modèles mentaux utilisés sont ceux d'un pilotage en boucle fermée lâche avec les paramètres : point visé sur la piste, axe de la piste, actions sur le manche. L'assiette Θ est alors variable mais non mesurée. Ces paramètres sont combinés et exploités avec leurs variations, leurs dérivées en fonction du temps.

En cela on imagine le pilotage du vecteur-vitesse en stabilisant sa trace fictive à son intersection avec le sol de la piste. En l'absence de guidage dans le plan vertical de type ILS ou VASI la pente peut varier, suivant le vent en particulier, autour de 3°.

d – analyse des dérives

La pente moyenne γ est de 3°, avec une dispersion allant de 2,5 à 4°.

L'assiette moyenne Θ est de 3°, avec une dispersion de 1,5 à 4,5°.

Ces valeurs reflètent la variété des situations d'approche.

6 - de 100 ft à 50 ft

a - description de la tâche et des objectifs

La durée moyenne de cette séquence est de **4 sec.**

Le point clé de l'arrondi est le passage à 50ft. Son début se situe un peu avant si la vitesse verticale Vz estimée, visuellement ou grâce au radioaltimètre, paraît trop forte ou si à cette hauteur on est un peu en avant du début de piste, ou un peu après si l'approche a été « plate », mais de toute façon on débute instinctivement ou non une action à cette information radioaltimétrique.

C'est à cette hauteur qu'on commence à ressentir (naturellement ou artificiellement si les lois de pilotage manuel en « fly-by-wire » comportent une correction automatique) l'effet de sol qui ira s'accroissant lorsque la hauteur hz diminuera. Le regard glisse alors assez rapidement du point visé lorsqu'on était à 100ft, vers l'extrémité de la piste ou au moins vers un point situé sur la piste bien en avant de l'avion.

Notez que la vitesse d'approche est sensiblement supérieure à celle des autres Airbus, d'environ 15%, et que la vitesse verticale moyenne stabilisée est aussi supérieure aux 3 m/s fatidiques de limitation d'impact. D'où l'obligation de diminuer cette dernière.

L'objectif primaire est de se poser, c'est-à-dire de toucher des roues. Les objectifs dérivés sont

- (1) de le faire « en douceur »,
- (2) aussi près que possible de la ligne médiane de la piste,
- (3) aussi rapidement que possible pour rester dans des limites correctes de performances et d'occupation de la piste conformément à son état (sèche, inondée, verglacée),
- (4) en évitant de toucher de la queue pour les avions concernés,
- (5) en conservant les ailes horizontales pour éviter le contact des moteurs avec le sol.

Suivant les cas il y a choix d'une des priorités entre les quatre, les trois autres devenant la conséquence du choix.

b – perceptions

- l'ensemble des perceptions visuelles, toutes basées sur la vision de la piste en fonction de sa propre position relative par rapport à elle :

- (1) perception des vitesses de rapprochement par la déformation de l'image du paysage;
- (2) la hauteur perçue estimée d'après l'expérience antérieure stockée en mémoire, et d'après la position dans le cockpit par rapport au sol enregistrée mentalement au cours du roulage au sol ou au cours des atterrissages précédents sur ce type d'avion ; en dynamique cette perception estimée de hauteur est tirée de la vision directe vers l'avant, et de la vision périphérique par le défilement de la piste sous le nez de l'avion (vision du revêtement) et sur les côtés (ce qui donne une perspective visuelle plus large pour mieux estimer une hauteur); cela en comparaison avec l'image mentale enregistrée au décollage et l'expérience des atterrissages antérieurs, pas uniquement effectués sur le type d'avion actuel ; il s'agit d'un modèle mental (MM) ;

(3) la vitesse verticale perçue, là-aussi basée sur la vision directe vers l'avant, par la « déformation » de l'image de la piste lorsque h_z diminue, et sur la vision périphérique des côtés ; à noter que cette perception vient en complément des informations radioaltimétriques, et elle ne devient essentielle qu'en l'absence de radioaltimètre ;

(4) le déplacement des références visuelles dans le plan vertical, conséquence des variations de Θ .

A noter que le canal visuel est unique pour une analyse cognitive de toutes les fonctions élémentaire constituant les 2 fonctions cognitives principales FC1 et FC2 d'arrondi, et donc qu'elles transitent toutes par la mémoire de travail court terme Mct en partage de temps (« time sharing ») pendant la durée de persistance sur la Mct (10 à 20 sec). Le traitement séquentiel conscient amène l'obligation de donner des priorités et de faire des choix, ainsi qu'on le verra plus loin.

A 50ft on peut donner un coup d'œil rapide aux instruments, sur l'assiette Θ ou sur la vitesse VC, mais on le fait surtout s'il y a doute sur l'un de ces paramètres, par exemple si la pente d'approche γ était difficile à stabiliser et/ou était bien différente de 3° .

- les perceptions auditives, essentiellement les informations radioaltimétriques (verbales automatiques ou lues par le PNF, pilote non en fonction ou « pilot not flying »). Mais aussi les indications données par le PNF et les alarmes éventuelles.

Les informations de hauteur radioaltimétrique deviennent l'élément principal d'estimation de la vitesse verticale V_z , par la combinaison de leurs valeurs et de leur fréquence, que la perception visuelle mentionnée ci-dessus ne vient que confirmer.

Les variations de bruit des moteurs ne sont perçues que de façon secondaire, le plus souvent inconsciemment.

- les perceptions inertielles (linéaires pour le facteur de charge, et de rotation par l'oreille interne) sont les plus difficiles à définir. Expérimentalement, pour cette phase particulière du vol, la sensibilité existe surtout aux variations rapides même de faible intensité et assez peu aux valeurs absolues. Les modes propres de flexion du fuselage, excités par la turbulence ou par un couplage piloté, peuvent amener des oscillations en tangage de pompage piloté dans les fréquences entre 0,4 et 2 Hz (phénomène de résonance du système couplé pilote-avion). Ce pompage piloté peut aussi survenir indépendamment des flexions du fuselage. De même on peut observer parfois des oscillations pilotées en roulis, pour des fréquences moindres.

- les perceptions tactiles, sur le manche et sur les leviers de poussée, servant à la fois en sorties de commande d'action et en entrées de retour d'asservissement d'effort ou de position dans la boucle secondaire de dosage des efforts et des positions des commandes de vol.

Normalement le palonnier n'est pas utilisé dans cette séquence.

c – fonctionnement cognitif

Le pilotage est désormais géré par l'agent **AG1** en boucles fermées et complexes car dépendant simultanément de plusieurs perceptions visuelles, de l'intégration des informations radioaltimétriques, avec interférence entre ces perceptions et le choix de priorité à leur donner, des perceptions tactiles sur le manche et les leviers de poussée. Il agit avec les fonctions cognitives :

- **FC1** dont les caractéristiques sont les suivantes :
 - les objectifs sont ceux décrits en (a)
 - les entrées sont les perceptions décrites en (b)
 - les sorties sont les perceptions manuelles de pression commandée sur le manche d'une main, et de positionnement sur les leviers de poussée des moteurs de l'autre main. Cette pression sur le manche commande de façon univoque, via le complexe circuit des commandes de vol, un couple longitudinal faisant varier l'incidence α , donc l'assiette Θ et la vitesse verticale V_z .

Dans le cas des Airbus l'action de la main sur les leviers de poussée a deux objectifs opposés suivant les situations: couper l'action de l'Autothrust et réduire à fond les leviers pour un atterrissage, ou pousser à fond les leviers pour une remise de gaz si elle s'avérait nécessaire.

- **FC2** qui n'est utilisée que pour stabiliser le cap avec l'objectif de stabiliser aussi les ailes horizontales.

- Les éventuelles corrections nécessaires pour FC2 s'effectuant en partage de temps avec FC1, l'attention requise pour cette dernière peut subir une diminution de capacité si les corrections latérales nécessitent des interventions importantes.

Notez que ces fonctions cognitives FC utilisent simultanément plusieurs boucles d'asservissement pour les actions en vue du respect des objectifs : pour celles concernant la correction des écarts détectés et pour celles concernant le dosage des mouvements des commandes de vol.

d – analyse des dérives

Les valeurs moyennes et les dispersions restent les mêmes.

7 - de 50 ft à 20 ft

a - description de la tâche et des objectifs

La durée moyenne de cette phase est d'environ **3 sec** suivant la vitesse verticale au passage de 50 ft.

C'est le début de l'arrondi et la manœuvre se poursuivra jusqu'au toucher des roues de façon continue, évolutive, dynamique. Elle concerne le passage de l'avion d'un là de mécanique du vol « à l'état pur » pouvant être pris en compte totalement par des

mécanismes. En pilotage humain le pilote fait de son mieux pour que son agent AG1 responsable du pilotage manuel agisse de façon analogue aux environnements à 3 dimensions, à celui de la piste à 2 dimensions. L'atterrissage au pilote automatique prouve qu'il s'agit «fonctions de transfert utilisées en atterrissage automatique », grâce à ses fonctions cognitives FC1 et FC2, pour exécuter la même tâche avec ses propres perceptions.

Bien que l'arrondi débute entre 100 et 50 ft, suivant la pente γ et le vent, 50 ft est une bonne hauteur de référence car elle correspond au passage normal du début de la piste et au début d'une bonne perception de l'effet de sol. Ce dernier contribue à une légère augmentation de la portance et à un couple piqueur.

L'arrondi, est effectué en exerçant autour de 50 ft une pression à cabrer sur le manche, destinée à incurver la trajectoire. Cette pression augmente donc avec la courbure de la trajectoire (facteur de charge) lorsque la hauteur h_z diminue.

b – perceptions

Les perceptions exploitables sont :

- visuelles :

- essentiellement la vision extérieure intégrant les vues directe et périphérique de la piste, de son environnement et de leur défilement ; notez à nouveau qu'on exploite à la fois l'image instantanée et sa vitesse de variation ;

- parfois la lecture rapide de l'indication de VC sur le PFD ;

- dans le cas des arrondis où l'assiette Θ est proche de sa limite, un rapide coup d'œil sur l'horizon artificiel s'avère parfois nécessaire pour une correction éventuelle (difficile) ; en général la priorité est conservée en totalité pour la vision vers l'extérieur ;

- inertielles (voir séquence précédente) se surimposant aux visuelles qui restent prépondérantes;

- auditives pour le défilement auditif des hauteurs annoncées ; la durée entre les annonces de h_z est transformée qualitativement en vitesse verticale grâce à la mémoire court terme Mct ; les perceptions visuelles extérieures viennent en complément mais près du sol l'indication radioaltimétrique de la hauteur h_z donne une bonne idée sur la « valeur probable » de l'instant du toucher des roues ;

- tactiles dans l'action de « sortie » par la pression sur le manche ; il s'agit d'une mise en mémoire de la relation pression sur le manche / mouvement de l'avion.

c – fonctionnement cognitif

C'est la continuation de la séquence précédente.

Le schéma-cadre de cette action est mémorisé sous forme d'un modèle mental stocké dans la mémoire long terme Mlt du pilote. L'agent **AG1** applique ce modèle mental grâce à la fonction cognitive complexe FC1 et à la fonction FC2 déjà mentionnées, en les adaptant aux perceptions reçues.

Pour les deux il s'agit d'actions en boucle fermée, de « gains » de plus en plus grands, c'est-à-dire de traitement de plus en plus rapide de la boucle :
perceptions=>diagnostic=>choix=>action=>résultats=>perceptions=>diagnostic=>etc...,
avec l'approche du sol.

▪ **FC1** : cette action implique une augmentation du déplacement à cabrer du manche, donc de la pression de la main sur le manche. Cette augmentation de pression due au déplacement peut être assimilée à un retour d'asservissement que perçoit le pilote et qui le renseigne sur l'amplitude apportée à son action.

▪ **FC2** : n'est encore utilisée que pour stabiliser la position par rapport à l'axe de piste, par le cap en maintenant les ailes horizontales. Mais les éventuelles corrections nécessaires s'effectuant en partage de temps avec la fonction FC1, l'attention requise pour cette dernière peut subir une diminution de capacité si les corrections latérales nécessitent des interventions importantes.

Deux remarques au sujet de l'entrée visuelle.

- Une question était de savoir si le pilote est sensible à l'assiette Θ ou à sa dérivée q . Comme déjà dit, il exploite à la fois ses paramètres sensoriels directs et leurs dérivées ; il est donc sensible à la combinaison des deux au travers de sa mémoire court terme Mct et il les exploite simultanément sans qu'il apparaisse une prépondérance de l'une sur l'autre.

- Il est important de rappeler la très qualitative perception de la trajectoire relative par rapport à la piste, résultat de l'exploitation complexe de sa vision vers l'avant, en image instantanée, en son déplacement et en son défilement, sans aucun repère concret unique pouvant lui permettre une quelconque mesure précise. La hauteur, grandeur verticale, et sa dérivée la vitesse verticale, qui sont les paramètres essentiels ne sont que déduites qualitativement de cette vision vers l'avant. C'est dire la complexité du modèle mental utilisé et l'étonnante habileté acquise par les pilotes. Cette estimation par la vision est complétée par l'audition des hauteurs détectées par le radioaltimètre, donnant une idée de la vitesse verticale par l'intervalle de temps entre deux annonces.

▪ Notez qu'à partir de ce moment l'exploitation de chacun des paramètres utilisés comporte la préoccupation latente du respect de ses limitations, plaçant le pilote dans une sorte de couloir d'actions conscientes obligées dont il ne doit pas sortir.

d – analyse des dérives

- Des dérives significatives surviennent dans cette séquence.

Le début de l'arrondi commandé se situe à une hauteur moyenne entre 60 et 50 ft, avec une vitesse verticale V_z moyenne de 3,5 à 4 m/sec. Sa dispersion est importante, de 100 à 0 ft. Il se situe d'autant plus bas que la pente est faible, ce qui est normal car l'amplitude d'augmentation d'assiette Θ en est réduite. Là encore des dispersions sont dues à la variété des approches. Au plan cognitif le comportement est semblable à celui décrit en **c**.

- L'effort à cabrer sur le manche débute à ce moment. Auparavant sa valeur moyenne était nulle, l'avion étant équilibré longitudinalement. Cependant on observe une tendance se conservant jusqu'au toucher : les efforts à cabrer sont faibles, avec des déplacements de

manche en moyenne environ 4 fois moindres que ceux des autres A340, et surtout avec des actions correctives à piquer. Cela traduit un pilotage avec un contrôle rapide en boucle fermée des sorties tactiles près du neutre d'effort, avec des paramètres d'entrée changeant rapidement et l'obligation de plus en plus proche de réussir le toucher. De mémoire personnelle cette boucle « visuelle-tactile-réponse avion » aurait une constante de temps autour de 1 sec.

8 – de 20 ft au sol

a - description de la tâche et des objectifs

C'est la phase finale de l'arrondi dont la durée moyenne est de **5 à 6 sec.**

Normalement la réduction des moteurs se fait à 30 ft mais elle s'effectue fréquemment à 20 ft à l'annonce automatique vocale de l'ordre « RETARD » demandant de réduire la poussée (en anglais « retard » signifie « réduire »).

Sans aucune prothèse l'arrondi s'effectue donc avec une commande à cabrer destinée simultanément à incurver la trajectoire (augmentation d'incidence pour augmenter la portance contrant l'action du facteur de charge), et désormais à contrer la combinaison des 3 couples piqueurs (réduction des moteurs, réduction de vitesse, effet de sol) bien que l'effet de sol compense en partie la diminution de portance due à la diminution de vitesse.

Les objectifs sont les mêmes que ceux de la séquence précédente, avec une augmentation de la préoccupation de les atteindre correctement et de respecter les limitations de vitesse verticale V_z et d'assiette Θ au toucher. Il s'agit alors d'attention soutenue ou de stress.

La manœuvre de décrabe se situe dans cette période, entre 10 ft et le sol (pour le vent adopté en hypothèse). Elle consiste à ramener l'axe de l'avion parallèle à la piste en utilisant le palonnier afin que les roues du train d'atterrissage soient placées parallèlement à l'axe de roulage de la piste. Cette action provoque un roulis induit qu'il est nécessaire de contrer par un braquage correcteur latéral du manche afin de garder les ailes horizontales. La correction initiale de la dérive due au vent de travers étant ainsi supprimée l'avion est poussé latéralement par ce dernier et il est nécessaire que l'avion soit posé sur le sol avant qu'il quitte l'alignement du centre de la piste. Il faut donc que la manœuvre soit exécutée suffisamment tard pour éviter que le vent pousse l'avion à côté de l'axe, mais suffisamment tôt pour que les roues touchent le sol sans dérive latérale. Elle demande une concentration d'attention relativement importante par fort vent de travers. En fait les trains d'atterrissage sont plutôt tolérants et acceptent quelques degrés de dérapage à l'impact sur la piste.

b – perceptions

Identiques à celles de la séquence précédente, mais avec une meilleure perception de la position par rapport à la piste, surtout avec les annonces vocales 10 ft et 5 ft..

C'est aussi un moment où la tendance au pompage piloté est maximale.

c – fonctionnement cognitif

La tâche de l'agent **AG1** est maximale car il doit gérer en très peu de temps l'allocation des séquences temporelles nécessaires aux actions complexes des fonctions FC1 et FC2, suivant les priorités immédiates à donner aux objectifs déjà cités d'après les informations perçues, avec la capacité toujours limitée du travail mental en partage de temps, et avec la durée limitée de la mémoire court terme Mct.

L'objectif primaire est de se poser mais les objectifs dérivés deviennent tout aussi importants si un dépassement de leurs limitations est diagnostiqué comme très probable.

Il s'agirait d'éviter :

- (1) une Vz trop forte, avec la nécessité de réduire la valeur stabilisée en approche,
- (2) une dérive latérale trop importante par rapport à la ligne médiane de la piste,
- (3) une distance insuffisante pour le freinage,
- (4) une assiette longitudinale trop forte,
- (5) une inclinaison latérale prohibitive.

Ces séquences temporelles allouées vont de quelques dixièmes de seconde à la seconde. Il y a superposition de plusieurs boucles d'asservissement.

L'habileté nécessaire construite expérimentalement par les pilotes permet cette gymnastique cérébrale dans un vaste champ de variabilité. Cependant les limitations cérébrales mentionnées font que de temps en temps elles imposent des ratés aux meilleurs scénarios humains.

- **FC1** : c'est d'abord la continuation de la séquence précédente.

La réduction des moteurs est rapide.

La proximité immédiate du toucher des roues provoque une augmentation importante dans le gain de la boucle cognitive d'asservissement « entrées perçues \Leftrightarrow sorties tactiles/corrections ». Comme noté précédemment cette augmentation peut être la cause d'oscillations pilotées de résonance en tangage du système couplé avion-pilote. La flexibilité du fuselage peut aussi introduire des perceptions inertielles interprétées comme des déplacements verticaux intempestifs et amener des corrections oscillatoires pilotées tout aussi intempestives.

L'action, sans intervention d'un trim automatique quelconque, implique une augmentation du déplacement à cabrer du manche, donc de la pression de la main sur le manche. Comme déjà vu cette augmentation de pression due au déplacement peut être assimilée à un retour d'asservissement que perçoit le pilote et qui le renseigne sur l'amplitude apportée à son action avant de percevoir visuellement le résultat sur le mouvement avion. Il doit alors moduler cet effort présent pour obtenir la trajectoire relative correcte de l'avion jusqu'à la perception du toucher des roues. Le suivi de l'évolution de cette pression sur sa mémoire court terme Mct est, avec la vision de la piste, un retour d'asservissement concernant la façon dont il gère la manœuvre, et par intégration lui permettant une anticipation des actions à venir dans les prochaines secondes.

Expérimentalement le fait de moduler un effort offre moins de tendance à un couplage oscillatoire qu'un pilotage autour d'un zéro d'effort. Cette influence était très nette pour l'atterrissage de Concorde. Hypothèse : ce serait assimilable à une diminution apparente de

gain dans la boucle pilote-avion, contrant à l'approche du sol une augmentation concomitante de gain source de couplage par résonance de l'ensemble pilote-avion.

▪ **FC2** : la manœuvre de décroche demande aussi une attention soutenue, avec la nécessaire coordination en boucle fermée des actions latérales sur le manche et de celles sur le palonnier, avec les bons dosages. Cependant elle ne revêt une amplitude notable la rendant nécessaire que pour des composantes de vent de travers au-dessus de 10 kt. Et comme il faut assurer un contact rapide avec la piste, l'agent **AG1** doit gérer l'ensemble des deux fonctions FC1 et FC2 en partage de temps sur la mémoire court terme Mct, dans l'intervalle alloué de 5 sec. Il s'agit là d'une combinaison rapide de deux boucles complexes d'asservissement.

▪ Les objectifs combinés à respecter sont un toucher dans l'axe de la piste, assez rapide mais avec une vitesse verticale V_z contrôlée, une assiette longitudinale Θ maîtrisée et une assiette latérale nulle. L'ensemble des actions séquentielles se partagent pendant 5 sec une capacité d'attention commune.

Ainsi suivant l'urgence diagnostiquée, l'agent AG1 par exemple assigne sa fonction FC1 en contrôle conscient de l'arrondi en boucle fermée. Puis l'urgence du décroche lui imposant un contrôle conscient en boucle fermée il accorde un accès conscient à l'action de la fonction FC2. Pendant cette allocation de temps laissée à FC2 il laisse FC1 en automatique inconscient en boucle ouverte, qu'il reprend un peu plus tard (quelques dixièmes de sec à 1 ou 2 sec) en boucle consciente et qu'il recale avec les informations perçues alors.

Les pilotes sont bien entraînés pour cela, mais il arrive que ce séquençement rapide requière des allocations de priorités, par exemple soit en faveur du décroche, soit en faveur du contrôle vertical, laissant peu de temps à l'autre pour une boucle d'asservissement suffisamment serrée.

Une contrainte de limitation, par exemple le respect d'une assiette longitudinale Θ maximum, peut influencer le taux de cabrage à donner dans les 2 dernières secondes et conduire à « laisser s'échapper » la vitesse verticale V_z près de l'impact.

d – analyse des dérives

Le temps moyen entre le passage à 20 ft et le toucher est de 5 à 6 sec, pour une vitesse verticale moyenne d'impact au toucher V_{zi} de 1 m/sec.

Les dispersions sont importantes, de 1,5 à 11 sec pour le temps, et de 0 à 4 m/sec pour V_{zi} . Curieusement les problèmes d'atterrissages durs se situent aussi bien à des vitesses verticale d'impact V_{zi} faibles de 0,8 m/sec qu'à des fortes de 4 m/sec, avec une tendance à privilégier les grandes V_{zi} ce qui semble normal.

Plusieurs explications possibles :

- les limitations d'assiette Θ , qui sont respectées, limitant la tendance à trop arrondir ;
- la vitesse d'approche élevée qui ne donne pas l'envie de rester trop longtemps sans toucher des roues,
- la réduction des moteurs donnant une plus faible tendance à piquer que pour les autres A340, ce qui entrainerait une plus faible correction à cabrer, d'où une plus faible valeur du déplacement du manche.

Il est remarquable qu'aucun atterrissage dur ni aucun toucher de queue n'ont été observés en atterrissage automatique.

La boucle d'asservissement pilote-avion est très serrée dans cette séquence finale et le problème déjà cité de corrections autour du neutre d'effort est amplifié par l'obligation du résultat correct, avec en priorité l'évitement du toucher de la queue et la longueur de piste. Cette recherche d'évitement pourrait retirer du temps d'attention disponible dont pâtirait le contrôle de la vitesse verticale V_z à un moment où l'agent AG1 a besoin de tous les moyens d'exploitation des perceptions. D'où un relâchement de la boucle de contrôle de V_z . L'absence de toucher de queue pourrait confirmer cette hypothèse.

Les oscillations de trajectoire ou simplement de rotation d'assiette Θ pourraient expliquer l'apparente indépendance du facteur de charge sur le train d'atterrissage vis-à-vis de la vitesse verticale d'impact V_{zi} , en touchant « dans le zig ou dans le zag ». Sur Concorde le mouvement des gouvernes dans les 2 sec précédant l'impact déterminait irrémédiablement la V_{zi} , toucher « franc » ou toucher correct.

L'obligation de décrabe par vent de travers amène un partage du temps d'attention disponible diminuant d'autant la capacité d'attention nécessaire à la phase finale de l'arrondi, ce qui peut aussi expliquer des excès de vitesse verticale d'impact V_{zi} au toucher.

Enfin un autre paramètre est à considérer : la vitesse de traitement de boucles d'asservissement, c'est-à-dire la capacité mentale globale de les traiter. Ici interviennent des paramètres affectifs tels que la fatigue, l'appréhension, les préoccupations personnelles, etc. Ils n'ont pas d'influence directe sur les actions mais ils peuvent préconditionner mentalement le pilote.

9.2.4 - Commentaires

On peut comparer les conditions d'atterrissage en pilotage automatique et en pilotage manuel.

En automatique les informations « d'entrées », trajectoire, hauteur, vitesse, forces et moments sont données aux calculateurs en continu et de façon exactement quantifiée. Ces derniers fonctionnent en continu pour toutes les boucles d'asservissement. Ils donnent en continu les ordres aux gouvernes avec de faibles constantes de temps.

Le pilote ne fait que percevoir les informations nécessaires par des canaux de capacités limitées. Il traite les tâches assignées en boucles d'asservissement qui se partagent le temps sur une mémoire de capacité limitée. Il se donne lui-même, toujours en partage de temps, les priorités à donner à telle ou telle action engagée. Le plus intéressant est que la quasi totalité des pilotes le fassent correctement, avec certes une grande dispersion mais dans des marges acceptables. On ne s'attaque donc qu'à des exceptions dont il faudrait diminuer l'occurrence.

Mais une évidence s'impose : lorsque cela est possible un atterrissage automatique prend mieux en compte les équations de la mécanique du vol près du sol.

Que peut-on faire à la lumière de cette analyse pour améliorer la situation en pilotage manuel ?

Il faut s'attaquer aux faiblesses constatées :

- côté entrées :

le vecteur-vitesse projeté vers l'extérieur (HUD, Head-up display) permettrait une prise en compte directe de l'évolution de la trajectoire et, associé à une indication synthétisée et combinée de la hauteur radioaltimétrique, il donnerait la perception immédiate de la position de l'avion par rapport à la piste.

La technologie actuelle permettrait de donner une solution correcte adaptée au fonctionnement cognitif discontinu/continu humain. Une sorte de « directeur de vol » projeté sur le HUD donnerait l'indication de position souhaitée du vecteur vitesse sur la piste, fonction des paramètres clés introduits de façon exacte et continue (vitesse, énergie, hauteur, assiettes, cap, etc.). Le pilote devrait alors, de façon continue, amener l'indication du vecteur vitesse réel en coïncidence avec celle du directeur de vol en pilotant à l'aide du manche pour l'arrondi et du palonnier pour le décroché. En cas de problème le pilote pourrait à tout moment quitter le directeur de vol pour utiliser les informations visuelles classiques.

- côté sorties :

Le pilotage très évolutif avec des efforts légers, voire nuls, est contre-indiqué.

En fait plutôt que donner des prothèses sophistiquées au pilote il vaudrait mieux :

- soit entièrement automatiser la phase finale de l'atterrissage ou systématiser l'atterrissage automatique,
- soit lui donner de façon simple à exploiter de façon continue des entrées et des sorties cognitives qualitativement et quantitativement exactes.

Une erreur à ne pas refaire serait le mélange des automatismes et des interventions manuelles comme l'échec du Control Wheel Steering l'a démontré dans les années 1970 pour les approches ILS, où l'on permettait au pilote de superposer des corrections manuelles au fonctionnement du pilote automatique en interception des trajectoires d'approche.

10 – REFERENCES – BIBLIOGRAPHIE

Airbus (2008). *Flight Crew Operating Manual A330*. Document technique. Airbus : Toulouse.

Alekseev, E. P & Sviridov, V.A. (1990, Février). *Le stress chez le pilote - l'élément majeur du facteur humain en aviation*. Communication présentée au séminaire de l'OACI « Sécurité de vol et facteurs humains », Léninegrad (Russie), Février.

Allen, J. F. (1991). *Planning as temporal reasoning*. Communication présentée à la Deuxième Conférence Internationale sur les « Principles of knowledge representation and reasoning ». Cambridge : MA (USA), Avril.

<http://www.cs.rochester.edu/~james/kr91.pdf>

Andrieu, Q., Dehais, F., Lesire, C., Izaute, A, & Tessier, C. (2008, 3-4 Sept). *Towards a dynamic computational model of visual attention*. Communication présentée à la 1ère Conférence Internationale de HUMOUS, Brest (France).

<http://conferences.telecom-bretagne.eu/data/humous08/proceedings/04-andrieu08humous.pdf>

Amalberti, R. (1996). *La conduite des systèmes à risque*. Paris : PUF.

Amalberti, R. (2006). *Psychologie ergonomique*. Cours de Licence de psychologie 2ème année, IED Université de Paris VIII (France).

http://perso.lcpc.fr/roland.bremond/documents/cours_Amalberti.pdf

Baars, B.J. (1992). *Experimental slips and human error: exploring the architecture of volition*. New York: Plenum Press.

Baars, B. J. (2005). Global workspace theory of consciousness: toward a neuroscience of human experience? *Progress in brain research*, 150, 45-53.

Bilalic, M., McLeod, P. & Gobet, F. (2008). Inflexibility of experts - Reality or myth ? Quantifying the Einstellung effect in chess masters. *Cognitive Psychology*, 56 (2),73–102.

Bonnet, C. (1986). *Manuel pratique de psychophysique*. Paris: Armand Colin.

Boreham, N. C. & Patrick, J. (1996). Diagnosis and decision-making in work situation : an introduction. *Le Travail Humain*, 59 (1), 1-4.

Boy, G. (1998). *Cognitive function analysis*. New York : Ablex Publishing Corporation.

Boy, G. (2003). *Ingénierie cognitive : IHM et cognition*. Paris : Lavoisier.

Boy, G. (2011). *The handbook of Human-Machine interaction: a human-centered design approach*. Farnham: Ashgate

Boy, G. & Pinet, J. (2008). *L'être technologique. Rationaliser le comportement*. Paris: L'Harmattan.

Buhusi, C. & Meck, W. (2005). What makes us tick? Functional and neural mechanisms of interval timing. *Nature Reviews Neuroscience*, 6 (10), 755-765.

Carpenter, P.A., Just, M.A., Reichl, E. D. (2000). Working memory and executive function: evidence from neuroimaging. *Current opinion in Neurobiology*, 10 (2), 195-199

Chauvin, C. & contributions du GT 1 (2003, 20-21 Nov). *Prise de décision en situation dynamique et naturelle*. Journées plénières Psycho Ergo GDR 3169, Paris.

Chauvin C. (2003). *Gestion des risques lors de la prise de décision en situation d'interaction dynamique : approches systémique et cognitive*. In J. M. C. Bastien (Ed.), Actes des 2e Journées d'étude en Psychologie Ergonomique (EPIQUE'2003), 123-134, Rocquencourt : INRIA.

Cohen, D., Wherry, R.J. & Glen, F. (1996). Analysis of workload prediction generated by multiple resource theory. *Aviation, Space and Environmental Medicine*, 67 (2), 139-45

Corten, P. (1996). *Stress et stress pathologique, cours de psychopathologie du travail*, Université Libre de Bruxelles (Belgique).
<http://homepages.ulb.ac.be/~phcorten/CliniqueStress/DocumentsStress/Doc1.htm>

Davidson, M. J., Dove, L. & Wertz, J. (1999). Mental models and usability. Art. DePaul University, Cognitive Psychology 404, November 1999.
<http://www.lauradove.info/.../mental%20models.htm> -

De Brito, G., Pinet, J., Boy, G. (1998). *L'utilisation des checklists dans un cockpit d'avion de nouvelle génération*, Rapport technique EURISCO, Toulouse.

Dehaene, S (2006). *Psychologie cognitive expérimentale. Cours et leçon inaugurale*. Collège de France (Paris).
http://www.college-de-france.fr/media/psy_cog/UPL17104_sdehaenecours0506.pdf

Dehais, F, Lesire, C, Tessier, C, Chaudron, L (2000). *Conflits et contre-mesures dans l'activité de pilotage*. Art. ONERA-DCSD 2000
<http://www.laas.fr/rfia2004/actes/ARTICLES/244.pdf>

Dehais, F. (2004). *Modélisation des conflits dans l'activité de pilotage*. Thèse soutenue le 24 Mai 2004 à l'ISAE (Sup'Aero), Toulouse.

De Waard, D. (1996). *The measurement of drivers' workload*. Thèse publiée. Traffic Research Center Publication, University of Groningen (Pays-Bas).

De Waard, D., Van der Hulst, M., Hoedemaeker, M. & Brookhuis, K.A. (1999). Driver behavior in an emergency situation in the automated Highway system. *Transportation Human Factors*, 1 (1), 67-82.

Deharvengt, S. (2007). Règlement dans un domaine à risque : l'exemple de la formation CRM des pilotes de ligne. Art. in DGAC report 2007
<http://www.ep.liu.se/ecp/023/002/ecp2307002.pdf>

Didier, A. (sept. 1998). *Cerveau et comportement humains: exemple de la mémoire*. Communication présentée au 7^{ème} Forum de l'ANAE (CD ANAE 2004).

Dowell, S. R., Foyle, D. C., Hooey, B. L., & Williams, J. L. (2002). *The effect of visual location on cognitive tunneling with superimposed hud symbology*. Communication présentée au 46th Annual Meeting of the Human Factors and Ergonomic Society. Santa Monica, CA.
http://humanfactors.arc.nasa.gov/publications/20051025105002_Dowell_HFES02.pdf

Ehrlich, M. F., Tardieu, H., Cavazza, M., Johnson-Laird, P. N. (1993). *Les modèles mentaux : approche cognitive des représentations*. Paris : Masson.

Endsley, M. R. & Garland, D. J. (2000). *Situation awareness analysis and measurement*. Mahwah: Lawrence Erlbaum Associates.

GDR Psycho Ergo (2009). Contribution finale du GDR Psycho Ergo à la prospective du PIRSTEC, avril 2009
<http://www.pirstec.risc.cnrs.fr/ressources/accesfichier/63>

Giroto, V. & Johnson-Laird, P. N. (2005). *The shape of reason: essays in honour of Paolo Legrenzi*. Oxford: Taylor & Francis

Gonzalez, C., Dana, J., Koshino, H. & Just, M. (2005). *The framing effect and risky decisions: Examining cognitive functions with fMRI*. Journal of Economic Psychology, 26 (1), 1-20.

Hoc, J. M., Amalberti, R., & Boreham, N. (1995). Human operator expertise in diagnosis, decision-making, and time management. In J. M. Hoc, P. C. Cacciabue, & E. Hollnagel (Eds.), *Expertise and technology: cognition & human-computer cooperation* (pp. 19-42). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.

Hoc, J. M. & Amalberti, R. (1999). Analyse des activités cognitives en situation dynamique : d'un cadre théorique à une méthode. *Le Travail Humain*, 62 (2), 97-129.

Hollnagel, E., Mancini, G. & Woods, D. (1990). *Cognitive engineering in complex dynamic worlds*. London: Academic Press.

Hollnagel, E., Woods, D., & Levenson, N. (2006). *Resilience engineering: Concepts and precepts*. Hampshire: Ashgate 2006

Hollnagel, E. & Woods, D. (2005). *Joint cognitive systems*. Oxford: Taylor & Francis
Imbert, M (2006). *Traité du cerveau*. Paris: Odile Jacob.

- Irving, S. (1994). *A GOMS Analysis of the Advanced Automated Cockpit*. In: Adelson, Beth, Dumais, Susan and Olson, Judith S. (eds.) *Proceedings of the ACM CHI 94 Human Factors in Computing Systems Conference* April 24-28, 1994, Boston, Massachusetts. pp. 344-350.
- Ivry, R. & Schlerf, J. (2008). Dedicated and intrinsic models of time perception. *Trends in Cognitive Sciences*, 12 (7), 273-280.
- Johnson-Laird, P. N. (1983). *Mental models : Toward a cognitive science of language, inference and consciousness*. Cambridge: Harvard University Press.
- Just, M. A., Carpenter, P. A., & Miyake, A. (2003). Neuroindices of cognitive workload: Neuroimaging pupillometric, and event-related potential studies of brain work. *Theoretical Issues in Ergonomics*, 4, 56-88.
- Kahneman, D., Slovic, P. & Tversky, A. (1982). *Judgment under uncertainty: Heuristics and biases*. Cambridge: University Press
- Klein, G. (1999). *Sources of power : How people make decisions*. Cambridge: MIT Press
- Klein, G. A. (1989). Recognition-primed decisions. In W. B. Rouse (Ed.), *Advances in man-machine systems research* (Vol. 5, pp. 47-92). Greenwich : JAI Press.
- Laborit, H. (1981). *L'inhibition de l'action: biologie, physiologie, psychologie, sociologie. Biologie comportementale et de physio-pathologie*. Paris : Masson.
- Lebraty, J. F. (2007). Décision et intuition : un état des lieux. *Education & management*, 33, 33-37.
- Lecomte, P., Wanner, J.-C. & Wanner, N. (1989). *Expérimentation Archimède*. Rapport DER/NT/89/1238/C, Aérospatiale Protection Systèmes: Toulouse.
- Lecomte, P., Wanner, J.-C. & Wanner, N (1990). *Expérimentation Archimède*. Rapport DTI/NT/91/1344/NC, Aérospatiale Protection Systèmes : Toulouse.
- Lecomte, P. & Wanner, J.-C. (2004). *Images et modèles mentaux : Conscience de situation*. http://www.academie-air-espace.com/upload/doc/ressources/Representations_mentales.pdf
- Leplat, J. & Hoc, J.-M. (1983). Tâche et activité dans l'analyse psychologique des situations. *Cahiers de psychologie cognitive*, 3, 35-48.
- Li, W. C. & Harris, D. (2008). The evaluation of the effect of a short aeronautical decision-making program for military pilots. *International Journal of Aviation Psychology*, 18 (2), 135-152.
- Loukopoulos, L., Dismukes, R. D. & Barshi, I. (2009). *The Multitasking Myth: Handling Complexity in Real-World Operation*. Farnham: Ashgate.

- Miller, G. A. (1956). *The magical number seven, plus or minus two: some limits on our capacity for processing information*. *Psychological Review*, 63, 81-97.
- Miller, G. A, Galanter, E. & Pribram, K. H. (1960). *Plans and the structure of behavior*. New York: Hot, Rinehart & Winston.
- Newell, A. & Simon, H. A. (1972). *Human problem solving*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall.
- Newman, S. D., Just, M. A., Carpenter, A (2001). The synchronization of the human cortical working memory network. *NeuroImage*, 15 (4), 810-822.
- North, J, Ward, P, Ericsson, A, Williams, A M (2011). Mechanisms underlying skilled anticipation and recognition in a dynamic and temporally constrained domain. *Psychology Press ; Memory*, 19: 2, 155 — 168, First published on: 02 February 2011 (iFirst)
- Parasuraman, R. & Rizzo, M. (2007). *Neuroergonomics: The brain at work*. New York: Oxford University Press.
- Pastorelli, I. (2010). Rationalité des experts et traitement de l'erreur. In M. Amblard (Ed.), *La rationalité: mythes et réalité* (Chap. 14). Paris : L'Harmattan.
- Pinet, J. (1996). *Automatismes et facteurs humains dans l'aviation de transport*. Cours ENAC et SAE. Rapport Eurisco, Toulouse.
- Pouthas, V. & Macar, F. (2005). Les bases neuronales de la perception du temps et de la régulation temporelle de l'action. *Psychologie Française*, 50 (1), 27-45.
- Raufaste, E. (2001). *Les mécanismes cognitifs du diagnostic médical: Optimisation et expertise*. Paris : PUF.
- Rasmussen, J., Leplat, J. & Brehmer, B. (1991). *Distributed decision making: Cognitive models for cooperative work*. New York: John Wiley & Sons.
- Rasmussen, J. (1986). *Information processing and Human-Machine interaction: An approach to cognitive engineering*. Amsterdam: Elsevier.
- Reason, J. (1987). Decision aids: Prostheses or tools. *International Journal of Man-Machine Studies*, 27 (5-6), 463-470.
- Rips, L. J. (1990). Paralogical reasoning : Evans, Johnson-Laird, and Byrne on liar and truth-teller puzzles. *Cognition*, 36 (3), 291-314.
- Schneider, D.K. (1994). Thèse: Modélisation de la démarche du décideur politique dans la perspective de l'intelligence artificielle. Université de Genève
<http://tecfa.unige.ch/tecfa/general/tecfa-people/schneider.html>

Szalma, J. & Hancock, P. (2003). *On mental resources and performance under stress*. White paper, DOD Multidisciplinary Research Program: MURI Operator Performance Under Stress (OPUS). Department of Psychology and the Institute for Simulation and Training, University of Central Florida, Orlando, 2003

Selye, H. (1956). *The stress of life*. New York: Mc Graw-Hill.

Shannon, C. (1948). A mathematical theory of communication. *Bell System Technical Journal*, 27, 379-423 and 623-656.

Simpson, J. R., Snyder, A. Z., Gusnard, D. A. & Raichle, M. E. (2000). Emotion-induced changes in human medial prefrontal cortex: I. During cognitive task performance. *PNAS*, 98 (2) 683-687.

Tversky, A. & Kahneman, D. (1974). Judgment under uncertainty: Heuristics and biases. *Science*, 185, 1124-1131.

Tversky, A. & Kahneman, D. (1981). The framing of decisions and the psychology of choice. *Science*, 211, 453-458.

Van Daele, A. & Ait Ameer, L. (2010). Gestion des erreurs et des risques dans l'aide médicale urgente. *Le Travail Humain*, 73 (4), 299-318.

Van Hiel, A. & Mervielde, I. (2007). The search for complex problem-solving in the presence of stressors. *Human Factors*, 49 (6), 1072-1082.

Waldstein, S. R. & Katzel, L. I. (2005). Stress-induced blood pressure reactivity and cognitive function. *Neurology*, 64, 1746-1749.

Wanner, J. C. (2005). Vive les pépins.

<http://www.academie-air-espace.com/upload/doc/ressources/pepins.pdf>

Wickens, C., Gordon, S. & Liu, Y (1998). *An introduction to human factors engineering*. New York: Addison-Wesley-Longman..

Wickens, C. (2002). Multiple resources and performance prediction. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 3, 150-177.

Wickens, C. (2005). *Attentional Tunneling and Task Management*. Rapport technique NASA AHFD, University of Illinois, Urbana-Champaign.

Wickens, C. D. & McCarley, J. S. (2008). *Applied attention theory*. Boca Raton: Taylor & Francis.

Woods, D. & Hollnagel, E. (2006). *Joint cognitive systems: patterns in cognitive systems engineering*. Boca Raton: Taylor & Francis.

Wikipedia (2010). Le stress ou syndrome général d'adaptation. *Le stress chez l'humain*.
<http://fr.wikipedia.org/wiki/Stress>

Wikipedia (2010). Loi de Weber-Fechner.
http://fr.wikipedia.org/wiki/Loi_de_Weber-Fechner